

PFG

Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation

Organ der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie,
Fernerkundung und Geoinformation (DGPF) e. V.

Jahrgang 2012, Heft 2

Herausgeber:
Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Kresse

Schriftleiter:
Prof. Dr.-Ing. Stefan Hinz, Prof. Dr. rer.nat. Carsten Jürgens,
Prof. Dr. rer.nat. Lutz Plümer, Privatdozent Dr. techn. Franz
Rottensteiner und Dr.-Ing. Eckhardt Seyfert

Redaktionsbeirat (Editorial Board): Clement Atzberger, Andrew Frank,
Christian Heipke, Joachim Hill, Patrick Hostert, Hans-Gerd Maas, Wolfgang
Reinhardt, Camillo Ressl, Jochen Schiewe



E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung
(Nägele u. Obermiller) Stuttgart 2012



Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung
und Geoinformation (DGPF) e.V.
Gründet 1909

Die *Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation* (DGPF) e.V. unterstützt als Mitglieds- bzw. Trägergesellschaft die folgenden Dachverbände:



International Society
for Photogrammetry
and Remote Sensing

DAGM



Deutsche Arbeits-
gemeinschaft für
Mustererkennung e.V.



Herausgeber:

© 2012 Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation (DGPF) e.V.
Präsidentin: Prof. Dr. Cornelia Gläßer, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Institut für Geowissenschaften, Von-Seckendorff-Platz 4, 06120 Halle, Germany, Tel.: +49-345 55-26020
Geschäftsstelle: Dr. Klaus-Ulrich Komp, c/o EFTAS Fernerkundung Technologietransfer GmbH, Oststraße 2-18, 48145 Münster, Germany, e-mail: klaus.komp@eftas.com

Published by: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller), Johannesstraße 3A, 70176 Stuttgart, Germany, Tel.: +49-711 351456-0, Fax: +49-711 351456-99, e-mail: mail@schweizerbart.de
Internet: <http://www.schweizerbart.de>

⊗ Gedruckt auf alterungsbeständigem Papier nach ISO 9706-1994

All rights reserved including translation into foreign languages. This journal or parts thereof may not be reproduced in any form without permission from the publishers.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in dieser Zeitschrift berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Verantwortlich für den Inhalt der Beiträge sind die Autoren.

ISSN 1432-8364

Science Citation Index Expanded (also known as SciSearch®) Journal Citation Reports/Science Edition
Hauptgeschäftsführer: Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Kresse, Hochschule Neubrandenburg, Fachbereich Landschaftsarchitektur, Geoinformatik, Geodäsie und Bauingenieurwesen, Brodaer Straße 2, 17033 Neubrandenburg, Germany, e-mail: kresse@hs-nb.de

Schriftleiter: Prof. Dr.-Ing. Stefan Hinz, Karlsruher Institut für Technologie – KIT, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Englerstraße 7, 76131 Karlsruhe, Germany, e-mail: stefan.hinz@ipf.uni-karlsruhe.de, Prof. Dr. rer. nat. Carsten Jürgens, Ruhr-Universität Bochum, Geographisches Institut, Gebäude NA7/133, 44780 Bochum, Germany, e-mail: carsten.juergens@rub.de, Prof. Dr. rer. nat. Lutz Plümer, Universität Bonn, Institut für Geodäsie und Geoinformation, Meckenheimer Allee 172, 53115 Bonn, Germany, e-mail: pluemer@igg.uni-bonn.de, Privatdozent Dr. techn. Franz Rottensteiner, Leibniz Universität Hannover, Institut für Photogrammetrie und Geoinformation, Nienburger Straße 1, 30167 Hannover, Germany, e-mail: rottstein@ipi.uni-hannover.de und Dr.-Ing. Eckhardt Seyfert, Landesvermessung und Geobasisinformation Brandenburg, Heinrich-Mann-Allee 103, 14473 Potsdam, Germany, e-mail: eckhardt.seyfert@geobasis-bb.de

Erscheinungsweise: 6 Hefte pro Jahrgang.

Bezugspreis im Abonnement: € 219,- pro Jahrgang. Mitglieder der DGPF erhalten die Zeitschrift kostenlos. Der Online-Zugang ist im regulären Subskriptionspreis enthalten.

Anzeigenverwaltung: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller), Johannesstraße 3A, 70176 Stuttgart, Germany, Tel.: +49-711 351456-0; Fax: +49-711 351456-99.
e-mail: mail@schweizerbart.de, Internet: <http://www.schweizerbart.de>

Bernhard Harzer Verlag GmbH, Westmarkstraße 59/59a, 76227 Karlsruhe, Germany, Tel.: +49-721 944020, Fax: +49-721 9440230, e-mail: Info@harzer.de, Internet: www.harzer.de

Printed in Germany by Tutte Druckerei GmbH, 94121 Salzweg bei Passau, Germany.

PFG – Jahrgang 2012, Heft 2

Inhaltsverzeichnis

Editorial

KRESSE, W.: Schwerpunkttheft EuroCOW	89
--	----

Originalbeiträge

BLÁZQUEZ, M. & COLOMINA, I.: On INS/GNSS-based Time Synchronization in Photogrammetric and Remote Sensing Multi-Sensor Systems	91
SKALOUD, J. & SCHAER, P.: Automated Assessment of Digital Terrain Models Derived From Airborne Laser Scanning	105
HONKAVAARA, E., HAKALA, T., MARKELIN, L., ROSNELL, T., SAARI, H. & MÄKYNNEN, J.: A Process for Radiometric Correction of UAV Image Blocks	115
TOMMASELLI, A.M.G. & MARCATO JUNIOR, J.: Bundle Block Adjustment of CBERS-2B HRC Imagery Combining Control Points and Lines	129
NIEMEYER, F., BILL, R. & GRENZDÖRFFER, G.: Konzeption und Genauigkeitsabschätzungen für eine Bestimmung der äußeren Orientierung eines Unmanned Aerial Vehicles (UAV)	141
KURZ, F., TÜRMER, S., MEYNBERG, O., ROSENBAUM, D., RUNGE, H., REINARTZ, P. & LEITLOFF, J.: Low-cost optical Camera Systems for real-time Mapping Applications	159
JAGERT, F. & HAUBER, E.: Age Determination of Martian Low Shield Volcanoes by Crater Size-Frequency Measurements	177

Mitteilungen

Berichte von Veranstaltungen

48. Tagung der Arbeitsgruppe „Automation in Kartographie, Photogrammetrie und GIS“ (AgA), Bonn	187
Workshop „Neue Methoden für die Auswertung und Interpretation von Fernerkundungsdaten“, Halle	187
Workshop „3D Stadtmodelle“, Bonn	188
D-NordOst: 14. Anwendungsbezogener Workshop zur Erfassung, Modellierung, Verarbeitung und Auswertung von 3D-Daten, Berlin	192
Hochschulnachrichten	
Karlsruher Institut für Technologie, Dissertation Andreas Schmitt	194
Leibniz Universität Hannover, Dissertation Dirk Wegner	195
Leibniz Universität Hannover, Dissertation Jens Göpfert	196
Leibniz Universität Hannover, Dissertation Daniel Muhle	197
Veranstaltungskalender	199
Korporative Mitglieder	200

Zusammenfassungen der „Originalbeiträge“ und der „Beiträge aus Wissenschaft und Praxis“ (deutsch und englisch) sind auch verfügbar unter www.dgpf.de/neu/pfg/ausgaben.htm



Editorial

The PFG-issue 2/2012 is dedicated to the calibration and orientation of imaging sensors due to the biannually arranged workshop EuroCOW held at the Institut de Geomàtica in Castelldefels, Catalonia, Spain. EuroCOW stands for European Calibration and Orientation Workshop and is a joint symposium of Euro-SDR and ISPRS. Therefore, this PFG-number is a special issue for EuroCOW. At the same time, our journal remains an open forum for all the other authors who enrich PFG with their highly interesting articles about many different topics. The outcome is an issue that contains four articles of EuroCOW and three further ones which have been contributed by other authors. It is remarkable that despite the randomly submitted articles – at least from the editorial perspective – those articles follow the same range of topics, i.e. sensor orientation, questions around Unmanned Aerial Vehicles (UAVs), and the application of imagery taken by high-resolution spaceborne cameras. With no doubt, these are some of the key subjects of present research.

Dr. ISMAEL COLOMINA has been organizing EuroCOW for six years. EuroCOW 2012 is the fourth of its type. A year ago ISMAEL COLOMINA asked me, whether the best contributions to

the symposium could be published in a special issue of PFG. I immediately agreed. On the one hand the workshop follows the path of the DGPF-project on the evaluation of digital aerial cameras. On the other, the symposium's director is well known to many of us and highly acknowledged in the German photogrammetric community. His career has been linked to Germany for 25 years – a participation in a research project at the University of Stuttgart 1989, Hansa-Luftbild-Prize in 1996 together with JOSEP-LLUÍS COLOMER, and corresponding member of the Deutsche Geodätische Kommission since 2005.

However, a special issue EuroCOW means a further step towards an internationalisation of PFG. English, being the Lingua Franca of science, will mean that articles will be published in English as the rule. Authors from abroad will not just be occasional guests. It must be said here that the selection of PFG as the journal for the outstanding articles of this symposium is a huge acknowledgment of the work of PFG's past editorial board, which has achieved access to the prestigious citation index.

WOLFGANG KRESSE

Geleitwort

Das PFG-Heft 2/2012 ist der Kalibrierung und Orientierung von Bild gebenden Sensoren gewidmet. Anlass ist der im Zweijahresrhythmus stattfindende Workshop EuroCOW am Institut de Geomàtica in Castelldefels, Katalonien, Spanien. EuroCOW steht für European Calibration and Orientation Workshop und ist eine Gemeinschaftsveranstaltung von EuroSDR und der ISPRS. Das vorliegende PFG-Heft wird damit zwar zu einem Schwerpunkttheft EuroCOW, bleibt aber gleichzeitig ein offenes Forum für die vielen anderen Autoren, die mit ihren ganz unterschiedlichen Themen die PFG bereichern. So ist ein Heft entstanden, das vier Artikel von EuroCOW und drei weitere Originalbeiträge enthält. Bemerkenswert ist, dass trotz der aus Sicht der Schriftleitung zufällig eingereichten weiteren Artikel ein recht homogenes Themenspektrum entstanden ist, nämlich die Sensororientierung, der Einsatz von Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) und die Nutzung von Bildern hochauflösender Satellitenkameras. Fraglos sind dieses zentrale Themen der aktuellen Forschung.

Dr. ISMAEL COLOMINA veranstaltet EuroCOW seit sechs Jahren, in diesem Jahr zum vierten Mal. Als ISMAEL COLOMINA mich fragte, ob die besten Beiträge des Workshops in

einem Schwerpunkttheft der PFG zusammengefasst werden könnten, habe ich sofort zugestimmt. Zum Einen knüpft der Workshop thematisch an das DGPF-Projekt zur Evaluierung digitaler Luftbildkameras an. Zum Anderen ist die berufliche Entwicklung des Kongressdirektors seit über 25 Jahren eng mit Deutschland verbunden – unter anderem ein Forschungssemester 1989 an die Universität Stuttgart, der Hansa-Luftbild-Preis 1996 zusammen mit JOSEP-LLUÍS COLOMER und korrespondierendes Mitglied der Deutschen Geodätischen Kommission seit 2005.

Zugleich ist das Schwerpunkttheft EuroCOW ein weiterer Schritt zur Internationalisation der PFG. Englisch als Lingua Franca der Wissenschaft wird englischsprachige Artikel in der PFG zum Regelfall machen. Autoren aus dem Ausland werden nicht nur gelegentliche Gäste sein. Hier darf auch noch einmal erwähnt werden, dass die Auswahl der PFG als die Zeitschrift für die hervorragenden Artikel des Workshops eine große Anerkennung für die Arbeit der Schriftleitung in den vergangenen Jahren ist, der die Aufnahme in den wichtigen Citation Index gelungen ist.

WOLFGANG KRESSE



On INS/GNSS-based Time Synchronization in Photogrammetric and Remote Sensing Multi-Sensor Systems

MARTA BLÁZQUEZ & ISMAEL COLOMINA, Castelldefels, Spanien

Keywords: Synchronization, orientation, self-calibration, INS/GNSS, Multi-sensor systems

Summary: We propose a method to estimate time calibration parameters in the frame of a space-time integrated sensor orientation concept for the purpose of correct instrumental synchronization or synchronization verification in multi-sensor photogrammetric and remote sensing systems. The new method is based on the use of the INS/GNSS-derived velocities in addition to the commonly used INS/GNSS-derived positions and attitudes for aerial control. We present the corresponding mathematical models for local geodetic and global map-projected coordinate systems, discuss the separability between spatial and temporal calibration parameters, deduce various appropriate block configurations, and assess their behaviour with actual data. The results show that, for a number of block configurations, it is possible to correctly estimate synchronization calibration parameters with a precision of few tenths of a millisecond.

Zusammenfassung: Über INS/GNSS-basierte Synchronisation von Multisensor-Systemen in der Photogrammetrie und Fernerkundung. Im Beitrag wird eine Methode zur Schätzung von zeitlichen Kalibrierparametern vorgestellt, die bei Verfahren zur gemeinsamen räumlichen und zeitlichen Sensororientierung von Multisensor-Systemen eine Rolle spielen, und die entweder der richtigen Gerätesynchronisation oder deren Verifikation dienen. Der neue Ansatz berücksichtigt auch die aus den INS/GNSS-Beobachtungen abgeleitete Geschwindigkeit und nicht nur die bislang meist verwendeten Positionen und Neigungen. Der Beitrag entwickelt die mathematischen Modelle für lokale dreidimensionale kartesische und für globale projizierte Koordinatenreferenzsysteme, befasst sich mit der Trennbarkeit von räumlichen und zeitlichen Parametern, leitet daraus eine Reihe geeigneter Blockgeometrien ab und zeigt deren Verhalten mit realen Daten. Die Ergebnisse belegen, dass es bei bestimmten Blockgeometrien möglich ist, die zeitlichen Kalibrierparameter mit einer Genauigkeit von fast einer Zehntel Millisekunde zu schätzen.

1 Introduction

This paper is about the calibration of synchronization errors among the instruments of multi-sensor systems.

Synchronization errors are common in multi-sensor systems. They originate in the clocks that drive the instrumental temporal reference frames and in the delays that hardware and software introduce in the time transfer interfaces. In aerial photogrammetry and remote sensing, synchronization errors are obviously harmful in Direct Sensor Orientation (DiSO), are simply non-existent in clas-

sical aerial triangulation (Indirect Sensor Orientation, InSO), and are harmless in Integrated Sensor Orientation (ISO) because they are absorbed by the INS/GNSS per strip shifts. In the latter case they are recognizable through the usual pattern showing their flying sense dependency (Fig. 3). In terrestrial kinematic photogrammetry e.g., mobile mapping systems (GRAHAM 2010), the various sensors are mutually and critically related by an overall system clock, usually a subsystem of an INS/GNSS-based time-Position-Velocity-Attitude (tPVA) server.

Synchronization issues are usually dealt with at the hardware level by original equipment manufacturers and by system integrators. A system that is “internally well synchronized” is one in which all relevant subsystems have access to a common time reference frame within a given time error threshold. Synchronization of electrical devices and, in general, timekeeping are vast and complex engineering disciplines. Today, using off-the-shelf computer components, it is possible to design and build systems that are internally well synchronized down to 1 μ s (microsecond) with a resolution of 0.1 μ s. However, the resources required for correct time transfer and synchronization are not always available. Further, it is not always possible to synchronize internally well synchronized instruments to others. These situations, and possibly others, lead to what we call synchronization errors; i.e., to different time coordinates – time tags – being assigned to simultaneous events or to simply incorrect time coordinates being assigned to events. Here we assume that, contrary to the dictates of modern physics, simultaneity is an absolute concept and does not depend on the observer’s reference frame.

As opposed to spatial errors, to the best of our knowledge, synchronization errors are not modelled as such and therefore can not be estimated in photogrammetric and remote sensing orientation and calibration software. Even if Integrated Sensor Orientation (ISO) can deal with them implicitly it may be better to model them explicitly. Consider, for instance, an ideal airborne ISO block consisting of n strips, affected by a constant synchronization error, with a perfectly calibrated camera and perfectly determined INS/GNSS aerial control. In this case $3 \times n$ INS/GNSS shift unknowns could be replaced with just 1 calibration unknown; the temporal δt calibration one.

(Unfortunately, ideal blocks do not exist and there are always, small or large, original or remaining, camera calibration and INS/GNSS aerial control errors that have an influence similar to synchronization errors. As we shall see, the challenge of synchronization calibration is to distinguish between the δt calibration parameter or family of parameters from the camera calibration ones and GNSS or INS/GNSS shifts.)

The key idea behind our approach to spatio-temporal orientation and calibration is based on the observation that an INS/GNSS system delivers aerial control of the tPVA type and not just of the time-Position-Attitude (tPA) type. The use of the INS/GNSS 3D velocity estimates, in addition to those for position and attitude, makes it possible to relate time and space and consequently, allows for δt calibration in the context of spatial observations. More precisely, we will explore the combined determination of the images’ orientation parameters and of the instruments’ calibration parameters including the estimation of synchronization errors in an ISO block adjustment. Note that, when dealing with time, we face both orientation and calibration tasks as we have to estimate transformation parameters between different time reference frames, an orientation problem, and correction parameters – a calibration problem. Admittedly, many times, there is no essential difference between orientation and calibration.

Despite the relevance of synchronization in multi-sensor systems, in our geomatic literature research we found no discussion related to sensor synchronization calibration at the ISO or comparable levels. In robotics, where both machine vision grade and consumer grade sensors are commonly used, the synchronization problem seems to be more acute and there is a wealth of publications on the topic. However, their vast majority are unfeasible for our purposes since they require the implementation of specific communication features between the sensors like in HARRISON & NEWMAN (2011). A nice exception is the algorithm proposed in OLSON (2010). However, its context is rather different from ours where we count on an INS/GNSS system and on motion. In our previous research (BLÁZQUEZ & COLOMINA 2008) we introduced the use of INS/GNSS-derived linear and angular velocities for the estimation of constant δt in local geodetic (e, n, u) coordinate systems (l -type systems). In BLÁZQUEZ (2008) actual ISO data and simulated linear velocities were combined to validate the concept. In this paper we provide detailed mathematical models for constant δt calibration with INS/GNSS-derived linear velocities in local geodetic l -type systems and in global compound mapping-geodetic (E, N, h)

coordinate systems (*m*-type systems) as well as the first analyses and validation tests with actual data. We concentrate on the determination of multi-sensor system time calibration or, in other words, time orientation between the various instruments of a multi-sensor system for the case of GNSS receivers, inertial measurement units (IMUs) and frame cameras.

The paper does not tackle the exploitation of INS/GNSS-derived rotational and angular velocities for δt determination because of the importance of properly understanding the linear velocity case. Further, the paper does not cover the case of time dependent $\delta t(t)$ synchronization errors or the similar case of internal temperature dependent or other instrumental clock $\delta t(t)$ instabilities because in many cases instrumental clocks are slaved to the few ns (nanosecond) precise output synchronization signals of GNSS receivers, thus guaranteeing stable internal time reference frames just affected by a δt time offset inaccuracy. The estimation of $\delta t(t)$ would require its modelling as a stochastic process and a dynamic observation model in the form of a stochastic differential equation or differential observation equation involving $\delta t(t)$.

Our research on time calibration in multi-sensor systems is not directly motivated by the improvement of point or orientation determination accuracy, but rather by the general progress in sensor calibration. The result of accurate time calibration is more accurate geometric calibration as geometric calibration parameters are no longer contaminated by synchronization errors. Moreover, an independent method to check the correctness of hardware instrument synchronization would be of interest to original equipment manufacturers, equipment integrators and advanced users.

The paper is organized as follows: section 2 presents the observation equations for the estimation of δt , section 3 discusses the geometry of space-time Integrated Sensor Orientation, section 4 introduces the validation criteria for the models and the overall space-time calibration concept, section 5 describes the validation data and the experiments conducted, and section 6 presents and discusses the results.

2 Mathematical Models

As mentioned, this paper introduces a new mathematical model to calibrate synchronization errors in global compound mapping-geodetic *m*-type coordinate systems and, for the sake of completeness, reviews the mathematical model in local geodetic *l*-type systems (BLÁZQUEZ 2008). Both models are based on the idea presented in BLÁZQUEZ (2008) “The sensor calibration and orientation problem is not a 3D spatial problem, it is a 4D spatio-temporal one. Moreover, the INS/GNSS-derived data contain not only positions and attitudes, they also contain velocities.”

In *l*-type coordinate systems, the aerial control observation equations that relate the δt synchronization parameter to the position and velocity aerial observations are

$$X^l + v_x^l = P^l + R_c^l(\Gamma) \cdot (A^c + N^c) + S^l - (V^l + v_V^l) \cdot \delta t \quad (1)$$

The position control aerial equation above is complemented with the usual equation for attitude aerial control

$$R_c^l(\Gamma) = R_b^l(\chi + v_\chi^l) \cdot R_c^b \quad (2)$$

In *m*-type coordinate systems, the above equations become

$$X^m + v_X^m = P^m + R_c^m(\Gamma) \cdot (A^c + N^c) + S^m - M(s_l^m) \cdot R_l^m(\eta) \cdot (V^l + v_V^l) \cdot \delta t \quad (3)$$

$$R_c^m(\Gamma) = R_l^m(\eta) \cdot R_b^l(\chi + v_\chi^l) \cdot R_c^b \quad (4)$$

The coordinate reference frames and variables involved in (1) to (4) are described in Tabs. 1 and 2.

Tab. 1: Coordinate Reference Frames.

<i>m</i>	Compound mapping-geodetic global terrestrial frame (Easting-Northing-height)
<i>l</i>	Cartesian local terrestrial frame (east-north-up)
<i>b</i>	IMU instrumental frame (forward-left-up)
<i>c</i>	Camera instrumental frame

Tab. 2: Variables.

$X^m = (x, y, z)^m$	aerial position observation in m -frame
$v_X^m = (v_x, v_y, v_z)^m$	aerial position observation residuals in m -frame
$X^l = (x, y, z)^l$	aerial position observation in l -frame
$v_X^l = (v_x, v_y, v_z)^l$	aerial position observation residuals in l -frame
$R_b^l(\chi)$	INS/GNSS attitude matrix
$\chi_b^l = (\psi, \theta, \gamma)_b^l$	aerial attitude observation (parameterized by the traditional Euler ψ heading, θ pitch and γ roll angles)
$v_\chi = (v_\psi, v_\theta, v_\gamma)$	aerial attitude observation residuals
$V^l = (v_e, v_n, v_u)^l$	aerial velocity observation
$v_V^l = (v_{v_e}, v_{v_n}, v_{v_u})^l$	aerial velocity observation residuals
$P^m = (E, N, h)^m$	camera projection centre in m -frame
$P^l = (e, n, u)^l$	camera projection centre in l -frame
$R_c^m(\Gamma)$	camera attitude matrix (parameterized by the Euler angles $\Gamma_c^m = (\omega, \varphi, \kappa)_c^m$)
$R_c^l(\Gamma)$	camera attitude matrix (parameterized by the traditional Euler angles $\Gamma_c^l = (\omega, \varphi, \kappa)_c^l$)
$A^c = (a_x, a_y, a_z)^c$	camera-to-IMU lever arm
$N^c = (0, 0, n)^c$	camera nodal vector (n is the camera nodal distance)
$S^m = (s_E, s_N, s_h)^m$	GNSS shift correction vector in m -frame
$S^l = (s_e, s_n, s_u)^l$	GNSS shift correction vector in l -frame
δt	multi-sensor synchronization calibration parameter
R_c^b	camera-to-IMU relative attitude (boresight) matrix (parameterized by the Euler angles $\Upsilon_c^b = (v_x, v_y, v_z)_c^b$)
s_l^m	scale factor of conformal map projections that depends on P^m with $M(s^m) = \text{diag}(s_l^m, s_l^m, l)$
$\eta_l^m, R_l^m(\eta)$	meridian convergence angle of conformal map projections at P^m and its three-dimensional rotation matrix – rotation around the normal line to the ellipsoid through P^m – that aligns the local frame l to the mapping frame m

3 The geometry of space-time Sensor Orientation and Calibration Networks

The mathematical models introduced in the previous section together with the usual ISO models such as collinearity (photogrammetric observations), ground control (point position observations) and aerial control (tPA observations) as presented, for instance, in BLÁZQUEZ & COLOMINA (2012) lead to a new type of photogrammetric network in which both space and time, orientation and calibration parameters are estimated. As with previously existing photogrammetric networks, like bundle self-calibrating or ISO blocks, a space-time ISO network exhibits a “geometry” that is a function of the number, quality and distribution of

observations, of the models in use and of the number and distribution of unknown parameters. A “strong” geometry makes it possible to estimate more parameters than a “weak” geometry, or to better estimate them. A network’s geometry is largely influenced by the block configuration; i.e. the number, distribution, length and flying sense of strips; the degree of image overlap and the ground control point distribution.

Understanding space-time network geometries makes it possible to properly configure blocks and select the models and observations required for accurate δt determination. For this purpose, we will now discuss the impact of synchronization and other related systematic errors – like camera calibration and GNSS or INS/GNSS aerial control position errors – on some relevant parameters.

A constant synchronization error Δt causes a 3D error $\Delta t \cdot V(t)$ in the aerial control position coordinates at time t and, therefore, on the ground point coordinates. In a typical aerial photogrammetric mission and within a strip, the velocity vector $V(t)$, if $V(t) = (v_E(t), v_N(t), v_h(t))^T$, is almost constant with $v_h(t) \approx 0$ and images are horizontally stabilized. Thus, the impact of the Δt error is a horizontal shift $\Delta t \cdot (v_E(t), v_N(t))^T$ where the velocity vector $(v_E(t), v_N(t))^T$ describes the instantaneous direction and sense of the trajectory. We note that the error $\Delta t \cdot (v_E(t), v_N(t))^T$ is independent from the flying height and that the size of Δt depends on the instrument and system (a 1 ms error at a flying speed of 300 km/h results in a spatial error of 8.3 cm).

It is also known that an error $(\Delta x_0, \Delta y_0)^T$ in the coordinates of the camera principal point $(x_0, y_0)^T$ results in an approximate horizontal ground shift $R_h(\kappa) \cdot m \cdot (\Delta x_0, \Delta y_0)^T$ where m is the image scale factor and $R_h(\kappa)$ is a 2D horizontal rotation of angle κ . This error is flying height-dependent and, if the camera reference frame is aligned to the forward-left-up directions of the aircraft, then the component of the error $R_h(\kappa) \cdot m \cdot (\Delta x_0, 0)^T$ behaves similarly to $\Delta t \cdot (v_E(t), v_N(t))^T$.

Errors in the camera-to-IMU and IMU-to-GNSS antenna relative positions (lever arms), and even in the calibration of the GNSS receiver's antenna phase centre, have similar,

flying strip sense-dependent and height-independent, effects. These errors are in the order of up to a few centimetres.

Last, the systematic errors in the GNSS or INS/GNSS aerial control observations are highly dependent on the navigation instrument quality and the observation and processing strategies. When the satellites' measurements are processed consistently, either in the differential GNSS or Precise Point Positioning (PPP) modes, the positional systematic errors are almost constant within strips or within blocks. Velocity errors can be ignored in our application because their impact is at the 10^{-5} m level. INS/GNSS systematic angular errors, contrary to what is sometimes assumed in photogrammetric modelling, are not constant due to the nature of angular velocity error propagation (triple integration) and the nature of INS/GNSS sensor fusion (errors concentrating on poor signal-to-noise ratio trajectory intervals).

Tab. 3 summarizes the identified sources of systematic errors in a space-time ISO network.

With the exception of the INS/GNSS velocities and angles, each error, e.g. Δe , discussed above can be modelled by the corresponding calibration parameter δe leading to a set of physical error models that include the parameter δe . The physical error models extend the collinearity, ground control and aerial control

Tab. 3: Main systematic error sources influencing orientation and calibration.

Error type	Scale-dependent impact	Strip sense-dependent impact	Velocity-dependent impact	Typical size
Synchronization	no	yes	yes	< 1 ms
	yes	yes	no	1–2 px
	yes	-	no	**
principal point, camera constant				
other camera distortions				
GNSS antenna centre	no	yes	no	1–5 cm
IMU-to-GNSS antenna	no	yes	no	0.2–2 cm
camera-to-IMU vector	no	yes	no	0.2–2 cm
camera-to-IMU rotation	yes	yes	no	0.002 deg
INS/GNSS hor. position	no	no*	no	< 5 cm
INS/GNSS ver. position	no	no*	no	< 15 cm
INS/GNSS velocity	no	no*	yes	< 0.01 m/s
INS/GNSS θ, γ attitude	yes	yes	no	< 0.01 deg
INS/GNSS ψ attitude	yes	yes	no	< 0.02 deg

*: depends on GNSS processing strategy and satellite geometry

**: depends on camera quality

ISO models with the δe 's and the appropriate formulas. However, some of these calibration parameters are strongly correlated and tend to over-parameterize the estimation process leading to numerical singularities or inaccurate estimates. As is customary in these cases, simplified estimation error models, i.e. a set of observation equation models, are deduced from the complex physical error model equations. The new estimation models are adequate for the network geometries encountered in real life situations.

At this point, based on the above discussion and preliminary network adjustments, we propose a number of realistic block configurations (Tab. 4), and the corresponding calibration parameters to be estimated, or equivalently, the simplified estimation models to be used.

With the exception of configuration (a) the selected block configurations are based on typical “space ISO blocks”. By “space ISO block” we understand a regular rectangular block with or without cross strips, with standard (yet camera type-dependent) forward and lateral overlaps, flown at a constant height and speed, with sparse ground control concentrated at the block ends and tPVA aerial control. The boresight matrix angles and self-calibration parameters, i.e. Ebner or Grün models, are always left as unknowns and estimated.

In all block configurations we assume correctly measured lever-arms (camera-to-IMU and IMU-to-GNSS antenna vectors), nodal vectors A^c and correctly calibrated GNSS receiver antenna phase centres.

Block configuration (a) is considered for the sake of completeness and to highlight the contribution of velocity differences to decorrelate scale-dependent and eventual INS/GNSS strip-dependent systematic errors. This configuration will not be analyzed in this paper due to a lack of actual data conforming to its requirements. Refer to BLÁZQUEZ (2008) for the performance of the (a) configuration with a combination of actual and simulated data.

Block configuration (b) corresponds to the situation in which INS/GNSS positional errors are similar for the whole block and where reliable camera calibration data are available. In both (a) and (b) cases, we expect INS/GNSS positional error corrections to be separable from the δt parameter.

Block configuration (c) includes cross-strips and considers the often-encountered situation in which strips flown in different senses exhibit different velocities. While INS/GNSS

Tab. 4: Block configurations for the determination of the time calibration parameter δt .

	Block strip configuration	Block velocity configuration	Camera calibration ($\delta x_0, \delta y_0, \delta f$) ^c	Time calibration δt	INS/GNSS correction (s_E, s_N, s_h) ^m
a	alt. flying sense	velocity differences within strips	no	per system	per strip
b	alt. flying sense	approximate constant velocity in block	no	per system	per block
c	alt. flying sense and cross-strips	velocity differences among strips	only $\delta x_0, \delta y_0$	per system	per block
d	alt. flying sense ----- 2 blocks different altitudes	approximate constant velocity within blocks	only $\delta x_0, \delta y_0$	per block or system	per block
e	alt. flying sense ----- 2 blocks different altitudes	approximate constant velocity within blocks	yes	per block or system	1 shift for the 2 blocks

alt.: alternating

GNSS shift parameters cannot be estimated per strip, the velocity differences make it possible to separate the $(\delta x_0, \delta y_0)^{cT}$ calibration parameters from δt .

Block configurations (d) and (e) correspond to the ideal situation of two blocks for the same camera, flown at different altitudes for the purpose of decorrelating the calibration parameters that exhibit a scale-dependent impact on the parameters of interest. In this way, δt only needs to be decorrelated from the INS/GNSS shift parameters.

4 Concept Validation Criteria

A comprehensive validation of space-time ISO network calibration and orientation according to the previous network geometry discussion requires datasets that are not readily available. Fortunately (section 5), we had access to a set that, although not specifically designed for δt calibration analysis, was close enough to some of the identified Tab. 4 configurations. Given these circumstances, we will concentrate on the (b), (c), (d) and (e) block configurations since case (a) was already investigated in BLÁZQUEZ (2008). Further, the validation of the space-time ISO block adjustment concept is designed as follows. Space-time ISO adjustments according to block configurations (b) to (e) will be performed. The results of the adjustment will be inspected for precision (through the standard deviations of the exterior orientation parameters (EO) and tie points (TP)), determinability (through the covariance matrices of the estimated parameters) and accuracy (by comparison to ground check point coordinates). The adjustment will be accepted if precision and accuracy are achieved and if the calibration parameters are determinable. We consider that accuracy is met if the root-mean-square error (RMSE) of the ground check points (ChP) is comparable to the RMSE of the ChPs obtained in a classical space tPA ISO adjustment. Analogously, we consider that precision is met if the mean of the standard deviations of the estimated exterior orientation (EO) and tie point (TP) parameters is similar to the classical space tPA ISO adjustment. Finally, we consider that the δt calibration parameter is well determined if

there are no suspicious (according to our experience) correlations greater than 0.75 with the other estimated calibration parameters. In addition to this, with δt and $\sigma(\delta t)$ the routine significance testing can be performed.

Last, once the precision, accuracy and determinability criteria are met, a final tPA space ISO adjustment will be conducted with a free INS/GNSS shift per strip and the rest of calibration parameters fixed to the estimated values in the tPVA spatio-temporal adjustment. If the estimated INS/GNSS shifts are not stochastically significant and/or do not exhibit a strip flying sense dependency, we will declare the block well calibrated, in space and time.

5 Test Data

As mentioned, datasets to test the performance of the proposed space-time ISO method are not readily available. The Vaihingen/Enz dataset described in KREMER & CRAMER (2008), although not specifically designed for the purpose, has a number of interesting features related to Tab. 4 configurations (velocity differences between strips – though moderate – and two blocks flown at different altitudes) that make it possible to derive conclusions relevant to this research. We used three blocks of the Vaihingen/Enz dataset: the Vaihingen/Enz-7 (V-7), the Vaihingen/Enz-20 (V-20) and their combination into a single two-altitude block (V-7-20). The blocks were flown in 2008, on the same day, one after the other, with IGI's Dual-DigiCAM-H/39 system and are named respectively after the nominal ground sample distance (GSD); V-7 for the 7 cm GSD block and V-20 for the 20 cm GSD

Tab. 5: Precision of observations.

Observables	V-7 & V-20 blocks
Image coordinates	$\sigma_x = \sigma_y = 1.4 \mu\text{m}$
Ground Control	$\sigma_E = \sigma_N = \sigma_h = 2 \text{ cm}$
Aerial Control	$\sigma_E = \sigma_N = 3.5 \text{ cm}$ $\sigma_h = 5.5 \text{ cm}$ $\sigma_{ve} = \sigma_{vn} = 5 \text{ mm/s}$ $\sigma_{vu} = 5 \text{ mm/s}$ $\sigma_\gamma = \sigma_\theta = 5 \text{ mdeg}$ $\sigma_\psi = 8 \text{ mdeg}$

one. The precision of the observations and block configurations are described in Tabs. 5 and 6 respectively. General block layouts are presented in Figs. 1 and 2.

Reference tPA space ISO adjustment results for precision and accuracy analysis are to be found in BLÁZQUEZ & COLOMINA (2012) and KREMER & CRAMER (2008). Thus, for the V-7

Tab. 6: Vaihingen/Enz-7 and Vaihingen/Enz-20 block configurations.

Test block	Vaihingen/Enz-7	Vaihingen/Enz-20
Equipment	IGI Dual-DigiCAM-H/39 Roll Angle Left H/39 -14:8 Roll Angle Right H/39 +14:8 AEROControl II-D	
Image size	2 x 5 cm x 4 cm 2 x 7216 x 5412 px	2 x 5 cm x 4 cm 2 x 7216 x 5412 px
Image size (along flight direction)	4 cm	4 cm
Image size (across flight direction)	2 x 5 cm	2 x 5 cm
Pixel size	6.8 μ m	6.8 μ m
Camera constant	82 mm	82 mm
Exposure time	1/800 s	1/350 s
Flying height above ground (\approx)	1150 m	2750 m
Horizontal speed range (\approx)	60-80 m/s	53-68 m/s
Scale (\approx)	1:14000	1:33500
Ground sample distance (GSD) (\approx)	10 cm	23 cm
No. of strips	6 (3+3)	3 (3+0)
No. of images	2 x 120	2 x 60
No. of images per strip (\approx)	2 x 20	2 x 20
No. of photo-observations	7910 x 2	11781 x 2
No. of photo-observations per image (\approx)	30 x 2	100 x 2
No. of ground control points (GCP)	8	8
No. of ground check points (ChP)	14	85
No. of tie-points (TP)	1106	2258
Overlap (\approx)	60% x 76%	60% x 64%
Coordinate reference frame	m-type	m-type

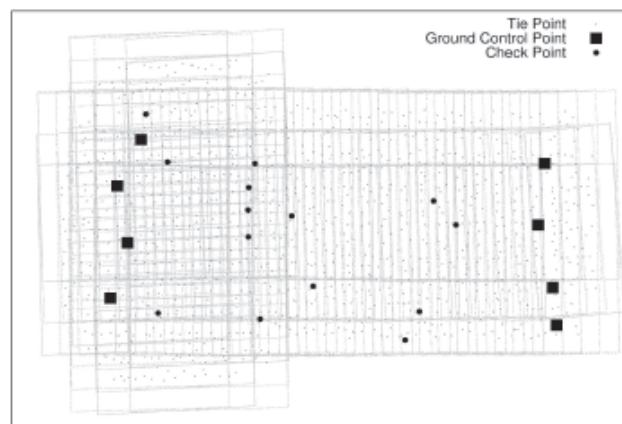


Fig. 1: Vaihingen/Enz-7 block layout.

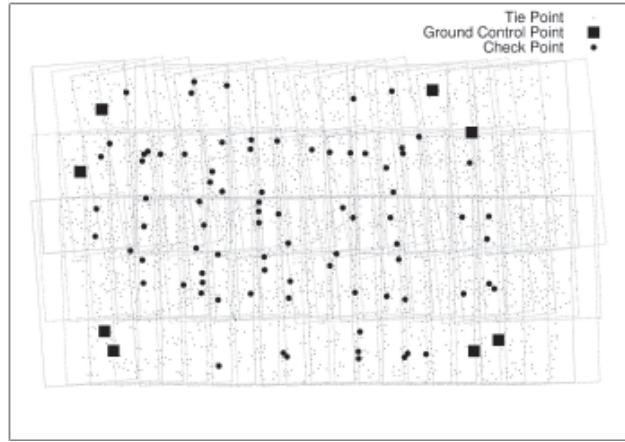


Fig. 2: Vaihingen/Enz-20 block layout.

block ChPs, accuracy (RMSE) is at the 2, 4 and 7 cm level for the two horizontal and vertical components and precision is slightly better. For the V-20 block, the RMSE of ChPs is at the 4, 7 and 17 cm level and precision is also slightly better. Precision of the images' exterior orientation parameters, also from tPA space ISO adjustments, is at the 3, 2 cm (horizontal and vertical) and 5, 3 arc sec (ω , φ and κ) level for V-7 and at the 6, 4 cm (horizontal and vertical) and 5, 3 arc sec (ω , φ and κ) level for V-20. More details on the reference precision and accuracy values are not necessary as the obtained results (section 6) are not affected by accuracy and precision problems.

Last, when dealing with synchronization of multi-head systems, there is always the question of how many δt shall be estimated: one per head or one per the combined multi-head system. In principle, both approaches are correct as long as the network geometries are strong enough and the choice is consistent with the system design. In our case, we decided to estimate one common δt for the two cameras because the dual head-system was designed for simultaneous shutter opening leaving any synchronization uncertainty as a common synchronization error (KREMER 2011).

6 Results

Tabs. 7 to 9 contain the main results of our research. All block configurations have been tested: (b) and (c) for the two blocks resulting in four test cases numbered 1 to 4; (d) and (e) for the combined V-7-20 block with a single δt parameter corresponding to test cases 5, 6 and (d) and (e) for the combined V-7-20 block with two δt parameters, for the images of the V-7 and V-20 blocks resulting in two more test cases 7, 8. For the test cases 3 to 5 and 7, the camera constants have been set and kept fixed to their nominal values; in test cases 1 and 2, the cameras' interior orientation elements have been set and kept fixed to known calibration values.

Tab. 7 describes the mean accuracy of the ground check points (ChP columns), the mean precision of the exterior orientation parameters (EO columns), the mean precision of the ground tie points (TP columns) and the precision of the camera-to-IMU [boresight] angles (γ column). Note that in test cases 5 to 8, the accuracy estimates are given separately for the V-7 ChPs (first row) and the V-20 ones (second row). All values are well within the acceptable ranges provided in section 5 and therefore all test cases pass the accuracy and precision validation criteria with the exception of the Northing component of the V-20 ChPs of test cases 6 and 8 (due to the global common INS/GNSS shift). As we will conclude later on, the two

cameras of the IGI Dual-DigiCAM-H/39 are already well synchronized and therefore no significant differences between the various test configurations are to be expected in the ground check point results when the δt calibration parameter is estimated.

Tab. 7 also contains the precision estimates for the camera-to-IMU, γ_c^b , angles which are all well determined at the arc sec level and with correlations with the camera interior orientation elements of less than 0.7 and exceptionally between 0.7 and 0.8.

Tab. 8 provides bounding information on the correlation of δt with the rest of the calibration parameters. With the exception of test case 4, all test cases lead to determinable δt estimates according to the criteria set in section 4. Total correlation values $b(\delta t)$ are provided for the sake of completeness. At this point of time, the interpretation of $b(\delta t)$ is not clear; however, the $b(\delta t)$ correlations seem to indicate a stronger V-7 than V-20 geometry. This is thought to be a consequence of V-7 being a larger dataset and having cross-strips, or because of its slightly larger velocity differences.

The actual calibration results are presented in Tab. 9 where parameters significantly

different from 0 are boldfaced (In Tab. 9, the standard deviation of each estimated parameter is indicated following the value of the calibrated parameter with a \pm symbol.). The test case 4 will not be discussed as it did not pass the δt determinability criteria. In the table, for the test cases 3 to 8, double rows within cells of the δf , δx_0 and δy_0 columns correspond to the two cameras. Double rows within cells of the s_E , s_N and s_h columns correspond to the two INS/GNSS shifts (one per each V-7 and V-20 blocks, in the test cases 5 and 7) whereas a single row corresponds to a common shift (test cases 1 to 4, 6 and 8). A similar convention is used for the double rows within cells of the δt column for the test cases 7 and 8 where two δt calibration parameters were used (one per each V-7 and V-20 blocks).

INS/GNSS shift parameters are not significantly different from 0. This is an independent confirmation of the quality of the GNSS aerial control that, after the calibration in space and time, does not exhibit significant systematic errors.

Test cases 1, 2, 3, 7 and 8 show a remarkable consistency in the determination of a block dependent δt . If we now analyze the interior orientation elements, δf , δx_0 and δy_0 , of the 3,

Tab. 7: Accuracy and precision results for the block configurations (b) to (e).

No.	Config. & Block	ChP RMSE (cm)			EO MEAN σ (cm, arc sec)					TP MEAN σ (cm)			γ^* σ (arc sec)	
		E	N	h	E_0	N_0	h_0	ω ϕ	κ	E	N	h	v_x v_y	v_z
1	b V-7	1.9	2.4	5.7	2.2	2.1	1.8	5	3	1.5	1.8	4.1	3	2
2	b V-20	3.8	7.1	12.3	3.9	3.0	4.8	3	3	3.1	5.3	14.1	3	3
3	c V-7	1.8	2.4	5.6	2.3	2.1	1.9	5	3	1.5	1.8	4.0	3	2
4	c V-20	3.8	7.2	12.7	6.0	3.0	4.9	4	3	3.1	5.4	14.1	4	3
5	d V-7-20	2.0 3.3	2.5 6.3	6.0 11.3	2.5	2.4	2.7	4	3	2.6	4.2	10.8	2	2
6	e V-7-20	2.0 3.3	2.9 9.5	6.0 11.6	2.3	2.1	3.0	4	3	2.5	4.1	10.8	3	2
7	d V-7-20	1.9 3.4	2.5 6.2	6.0 11.1	2.9	2.4	2.7	4	3	2.6	4.2	10.7	2	2
8	e V-7-20	1.9 3.3	2.9 9.4	6.0 11.3	2.7	2.1	3.0	4	3	2.5	4.1	10.8	3	2

*: $\gamma_c^b = (v_x, v_y, v_z)_c^{b^T}$ is the vector of boresight (camera-to-IMU) angles.

7 and 8 test cases we will see that the results of the test cases 7, 8 are consistent with each other and inconsistent with test case 3, particularly for the second camera. This may be an indication that the velocity differences between strips of the dataset used are not large enough to accurately separate δf , δx_0 and δy_0 from δt .

In principle, because of the larger number of observations and the two different block altitudes, test cases 5, 6, 7 and 8 should lead to the best results, and those most consistent among themselves. On the contrary, Tab. 9 shows that the δt and δx_0 estimates are inconsistent between the test cases 5, 6 and 7, 8. The reason for this (KREMER 2011) is the Dual-DigiCAM-H/39 time tagging convention (at the time of shutter opening) that differs from

the tagging convention assumed in the paper (at the mid exposure time). According to this and to Tab. 6, a correctly synchronized Dual-DigiCAM-H/39 head with the manufacturer's convention should lead (test cases 1, 2, 3, 7 and 8) to half of 1/800 s ($\delta t = 0.625$ ms) and half of 1/350 s ($\delta t = 1.43$ ms) for the V-7 and V-20 blocks respectively. These figures are consistent with and not significantly different from the results of test cases 2, 7 and 8. They explain the differences with test cases 5, 6 and empirically confirm that block configurations (b), (d) and (e) are appropriate for tPVA space and time ISO orientation and calibration. The result is remarkable if one considers that the datasets used were not originally designed for δt calibration (A further consequence of this

Tab. 8: δt correlation bounds with the rest of calibration parameters ($\rho(\delta t, -)$) and total correlation ($b(\delta t)$).

	1	2	3	4		5	6	7	8
$\rho(\delta t, -) \leq 0.7$	yes	yes	yes	no $\rho(\delta t, \delta x_0) = 0.8$		yes	yes	yes	Yes
$b(\delta t)$	0.934	0.984	0.961	0.996		0.956	0.945	0.950	0.943 0.986

Tab. 9: Precision and determinability results for the block configurations (b) to (e).

No.	Config. & Block	Interior orientation: (μm)			INS/GNSS shifts (cm)			Time (ms)
		δf	δx_0	δy_0	s_E	s_N	s_h	
1	b V-7	-	-	-	-0.1 ± 1.0	-2.5 ± 1.0	2.7 ± 1.5	-0.1 ± 0.1
2	b V-20	-	-	-	0.5 ± 1.8	3.5 ± 2.1	-3.1 ± 4.4	1.4 ± 0.4
3	c V-7	-	-2 ± 1 5 ± 2	14 ± 1 -10 ± 1	0.0 ± 1.0	-2.5 ± 1.0	4.5 ± 1.5	0.0 ± 0.2
4*	c V-20	-	-3 ± 2 -2 ± 2	15 ± 2 4 ± 2	1.3 ± 1.9	3.2 ± 2.1	-3.8 ± 4.5	0.4 ± 0.8
5	d V-7-20	-	-3 ± 1 -4 ± 1	11 ± 1 -1 ± 1	-0.0 ± 1.0 1.6 ± 1.8	-2.7 ± 1.0 6.1 ± 2.1	2.6 ± 1.6 -0.1 ± 3.9	-0.5 ± 0.1
6	e V-7-20	-2 ± 2 0 ± 2	-4 ± 1 -3 ± 1	12 ± 1 -3 ± 1	0.3 ± 0.9	-1.1 ± 0.9	4.1 ± 2.6	-0.5 ± 0.1
7	d V-7-20	-	1 ± 1 -1 ± 1	11 ± 1 -1 ± 1	-0.4 ± 1.0 0.8 ± 1.8	-2.6 ± 1.0 6.1 ± 2.1	2.7 ± 1.6 -0.3 ± 3.9	0.0 ± 0.2 1.4 ± 0.4
8	e V-7-20	-2 ± 2 0 ± 2	0 ± 1	12 ± 1 -3 ± 1	-0.1 ± 0.9	-1.0 ± 0.9	4.4 ± 2.6	0.0 ± 0.2 1.3 ± 0.4

*: row 4 is provided just for completeness as δt did not pass the determinability criteria; it is not considered in the discussion of results.

is that block configuration (c) could be neither validated nor disregarded as the velocity differences were apparently too small.).

To conclude, as proposed in section 4, we conduct a tPA space ISO adjustment with a free INS/GNSS shift per strip and the rest of calibration parameters fixed to the estimated values in the tPVA space-time adjustment of test case 7. The results of this adjustment for

the V-20 block show that the shifts are not significantly different from 0. They are depicted in Fig. 4 (All the images of the same strip have the same estimated INS/GNSS shift of the strip associated with them.). Fig. 3 shows the analogous pattern of the INS/GNSS shifts before tPVA space-time ISO orientation and calibration. As can be seen in Fig. 3, the INS/GNSS shift parameters were contaminated

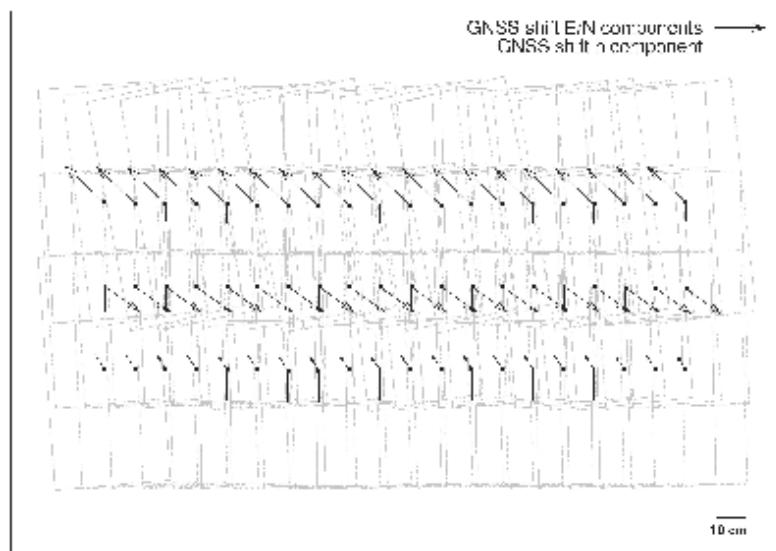


Fig. 3: V-20 INS/GNSS linear shifts before time calibration.

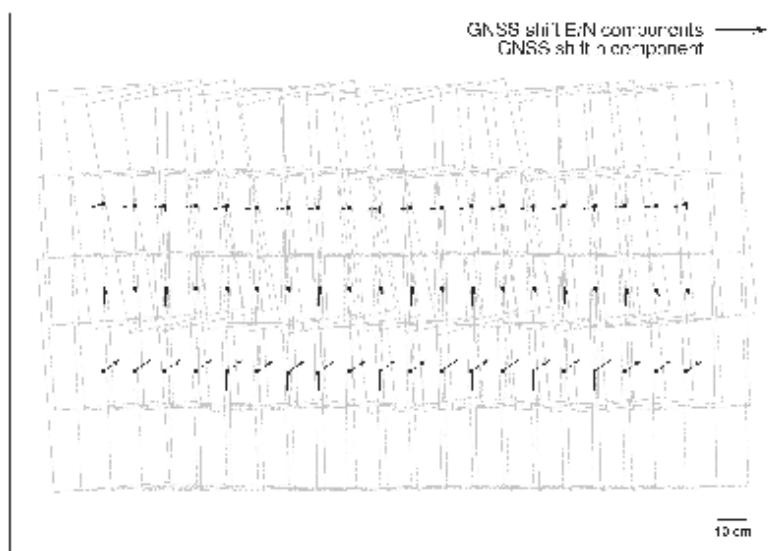


Fig. 4: V-20 INS/GNSS linear shifts after time calibration.

by flying sense-dependent spatial calibration errors. The effect of these errors vanishes in Fig. 4.

7 Conclusions

We have presented and discussed in detail the concept of spatio-temporal integrated sensor orientation for the case of constant δt synchronization calibration parameters between frame cameras and the temporal reference frame materialized by the on-board INS/GNSS system. The concept is based on the use of INS/GNSS-derived control velocities and on the decorrelation of the δt unknown parameter from other camera, system and aerial control calibration unknown parameters. Indeed, we have shown that a realistic – accurate – estimation of δt requires the careful separation between it and other calibration parameters through the appropriate block configuration. We have found that valid block configurations can be based on different altitude strips (d and e) or on standard blocks with pre-calibrated cameras (b). With the available data, we were not able to confirm that moderate velocity differences between strips (c) make it possible to separate the camera fundamental geometric calibration parameters (δf , δx_0 and δy_0) from the temporal ones δt . Cross strips are advisable because they add more data and contribute to a better determination of the camera geometric calibration parameters.

Some block configurations are more appropriate for the situation of a manufacturer's field calibration mission prior to delivery to customers; others are better suited to operational, on-the-job self-calibrating ISO. Some configurations (one INS/GNSS shift per block) are more advisable for small-area blocks and accurate short-range differential GNSS processing; others (INS/GNSS shifts per strip and velocity differences within strips) would perform better for large-area blocks and precise – though probably less accurate – long-range differential or non-differential PPP GNSS processing.

We do not claim that the mentioned and tested block configurations are the only possible ones. However, we do state that an accurate determination of δt requires separation

from the camera internal geometric calibration parameters, from system calibration ones and from INS/GNSS shifts. If this is achieved by any appropriate block configuration, then the INS/GNSS-derived velocities allow for δt precisions at the tenth of a millisecond level.

We envision two main scenarios where the proposed time calibration method can be of practical interest. The first one is on the manufacturers' side for system verification and calibration purposes. In this case, the configuration of geometric test flights can be fine tuned to serve also the needs of time calibration. The second scenario is that of end users. In this case, systems that require some sort of on-the-job synchronization, high demanding specifications, the need to verify the system performance for whatever reason or pre-calibration for DiSO can benefit from our method. In the latter scenario, at least initially, we recommend a conservative approach to block configuration where scale and/or velocity differences are big. For high-end geodata acquisition systems, considering their current status and foreseen progress, system verification and calibration purposes may probably dominate its applications. For simpler systems with lower cost off-the-shelf components the method may lead to routine procedures for both verification, calibration and production purposes.

The principle of the method, using INS/GNSS-derived velocities to link space and time, can be applied to other acquisition instruments or combinations of instruments like line cameras or laser scanners. Of course, new sensing geometries may require different block configurations than those discussed in this paper.

Last, we confirm that the Dual-DigiCAM, which integrates two independent cameras, behaved as indicated by the manufacturer as what we recovered from our estimated synchronization calibration parameters was the difference between the initial (IGI convention) and mid (our convention) exposure times.

Acknowledgements

The datasets Vaihingen/Enz blocks were provided by Dr. JENS KREMER (IGI GmbH, Ger-

many) and Dr. MICHAEL CRAMER (Institut für Photogrammetrie, Universität Stuttgart, Germany). The models were implemented and the results were obtained with the Generic Extensible Network Approach (GENA) platform from GeoNumerics (Barcelona, Spain). This support for our research is greatly appreciated. The research reported in this paper has been funded by the Spanish projects LIRA (Ref. P 44/08, Ministerio de Fomento, Spain) and GeoLandModels (Ref. PET2008 071, Ministerio de Ciencia e Innovación, Spain).

References

- BLÁZQUEZ, M. & COLOMINA, I., 2008: On the Use of Inertial/GPS Velocity Control in Sensor Calibration and Orientation. – EuroSDR, ISPRS, Proceedings of the EuroCOW 2008, Castelldefels, Spain, 8 p. (on CDROM).
- BLÁZQUEZ, M., 2008: A New Approach to Spatio-Temporal Calibration of Multi-Sensor Systems. – International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences **37** (B1): 481–486.
- BLÁZQUEZ, M. & COLOMINA, I., 2012: Relative INS/GNSS aerial control in integrated sensor orientation: models and performance. – ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing **67**: 120–133.
- GRAHAM, L.I., 2010: Mobile Mapping Systems overview. – Photogrammetric Engineering and Remote Sensing **76**: 222–228.
- HARRISON, A. & NEWMAN, P., 2011: TICSync: knowing when things happened. – Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation **ICRA2011**: 356–363, Shanghai, China.
- KREMER, J. & CRAMER, M., 2008: Results of a performance test of a dual mid-format digital camera system. – International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences **37** (B1): 1051–1057.
- KREMER, J., 2011: Private communication.
- OLSON, E., 2010: A passive solution to the sensor synchronization problem. – Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS): 1059–1064, Taipei, Taiwan.

Address of the Authors:

MARTA BLÁZQUEZ, ISMAEL COLOMINA, Institute of Geomatics, Av. Carl Friedrich Gauss 11, Parc Mediterrani de la Tecnología, E-08860 Castelldefels, Tel.: +34-93-5569280, Fax: +34-93-5569292, e-mail: {marta.blazquez}{ismael.colomina}@ideg.es

Manuskript eingereicht: Dezember 2011

Angenommen: Januar 2012



Automated Assessment of Digital Terrain Models Derived From Airborne Laser Scanning

JAN SKALOUD & PHILIPP SCHAER, EPFL, Lausanne, Switzerland

Keywords: Digital Elevation Models (DEM), laser scanning, quality, estimation

Summary: This paper presents the derivation of surface-related quality indicators describing the confidence-metrics of the final geo-products derived from airborne laser scanning (ALS). We first discuss the number of factors influencing the quality of the digital terrain models (DTM) and review the rigorous derivation of quality metric per each laser target when considering all the elements of direct-georeferencing as well as the scanning geometry. As in the context of DTM creation, however, the laser measurements are rarely used as single values; we extend this approach by considering other factors as classification, sampling density and interpolation. Further, we propose a novel procedure that enables an automated generation of a DTM quality map encapsulating all these factors assuming that the following conditions are fulfilled: i) the accuracy of each ground point involved in DTM generation is known or derived; ii) the DTM is represented as a regular grid where the elevation values are calculated by projecting the grid-cell centre coordinates on the corresponding facet of the TIN-model whose nodes are the irregularly sampled laser-points reflected from the ground. The derived DTM-quality map is thus influenced by the choice of grid resolution with respect to the actual density of the laser point-cloud, as well as the accuracy of individual laser returns. Finally, we present an example that demonstrates surface-quality map computed for an ALS point-cloud where the distribution of automatically classified ground points is very disparate and contains important gaps due to dense vegetation or insufficient surface-reflectance. We conclude with suggestions on possible applications of such quality-maps that can be associated as metadata to the DTM.

Zusammenfassung: Automatische Qualitätsbeschreibung der Höhenmodelle aus luftgestützten Lasermessungen. Dieser Artikel behandelt die Ableitung von Indikatoren zur Qualitätsbeschreibung von Höhenmodellen, die aus ALS-Daten abgeleitet wurden. Zuerst wird über die Anzahl der Faktoren, die die Qualität der Digitalen Geländemodelle (DGM) beeinflussen, diskutiert. Zudem wird eine konsequente Ableitung von einer Qualitätsmetrik, die die in die direkte Georeferenzierung einfließenden Fehlerquellen sowie die sich verändernde Messgeometrie berücksichtigt, überprüft. Weitere Begriffe wie Klassifizierung, Punktwolkendichte und Interpolation erweitern diese Metrik, da im Rahmen der DGM-Generierung die Lasermessungen nur selten als einzelne Werte betrachtet werden. Dann wird eine neue und automatisierte Erzeugung einer DGM-Qualitätskarte, die all diese Faktoren beinhaltet, vorgestellt. Voraussetzungen für diese neue Methode sind: i) Die Genauigkeit jedes einzelnen Punktes ist bekannt oder wurde abgeleitet. ii) Das DGM besteht aus einem regelmäßigen Gitter, in dem jeder einzelne Höhenpunkt mittels einer Projektion der Zellenzentrumskoordinaten auf die entsprechende Dreiecksfacetten des unregelmäßigen Dreiecksnetzes berechnet werden kann. Das Dreiecksnetz ist auf die Bodenpunkt-wolke bezogen. Die abgeleitete DGM-Qualitätskarte wird somit durch die Gitterweite in Bezug auf die tatsächliche Dichte der Punktwolke sowie die Genauigkeit der einzelnen Laserpunkte geprägt. Schließlich werden einige Beispiele von Qualitätskarten präsentiert, die aus Bodenpunkt-wolken mit sehr unterschiedlicher Punktdichte und einige Lücken wegen dichter Bodenvegetation oder man gelndem Reflexionsgrad generiert wurden. Es wird mit Vorschlägen für mögliche Anwendungen solcher Qualitätskarten, die als DGM-Metadaten betrachtet werden können, abgeschlossen.

1 Introduction

Airborne laser scanning (ALS) has become a well established and broadly employed technology in the mapping industry. The performance of the commercially available ALS systems is increasing at an astonishing pace, going hand in hand with the reduction in acquisition time and production cost. Surprisingly, the development of the software-tools accompanying data processing and quality monitoring has not followed. As the ALS technology requires concurrent employment of LiDAR and at least two navigation technologies, the generation of the laser point-cloud coordinates is relatively complicated, (GLENNIE 2007) while the subsequent classification and calculation of digital elevation models (DEM) is involved even more. Hence, the rigorous estimation of uncertainties or reliability parameters of DEM that shall consider the whole chain of treatment with a number of dynamically/time-varying parameters is reaching a great complexity, reason for which it has not been so far implemented into practice. Instead, the enterprises responsible for DEM creation are performing some alternative methods for quality assurance. These may be limited to a part of the processing, i.e. internal control between overlaps (LATYPOV 2002), or to specific section(s) of the model where external control is available (CSANYI & TOTH 2007). As for the

former, although sophisticated methods are available for parametrical adjustment (KÄGER 2004, FRIESS 2006), the estimated confidence-levels related to point-cloud or surface-patches are not utilized further in the DEM generation. The users of DEM have generally no access to the raw ALS observations and therefore may either assume a uniform precision (as provided) or attempt assessing DEM accuracy through independent means (ARTUSO et al. 2003, HODGSON & BRESNAHAN 2004). The later approach is almost always limited to parts of the model (larger or smaller) where external data are available as these come at additional cost.

The general term DEM encompasses digital surface models (DSMs) as well as digital terrain models (DTMs). Both DSM and DTM are interpolated from pre-classified and unorganized laser point-clouds. There exist many different interpolation techniques (DROJ 2008). However, the most frequent approach is the generation of a TIN (2.5D triangulation) followed by a linear interpolation at a predefined planar cell-size (Fig. 1).

The accuracy assessment for DEMs may follow different approaches (HABIB et al. 2009, KAREL et al. 2006) but is often limited in practice to the collection of independent measurements at discrete points (ground check points) gathered within the survey area. Subsequently, the reference coordinates are compared to

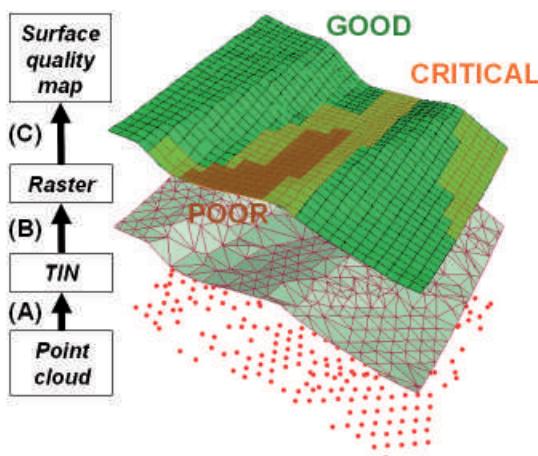


Fig. 1: Processing steps from raw point-cloud to surface quality map: (A) 2.5D triangulation, (B) Raster surface model by linear interpolation, (C) Surface quality map by point-to-surface error propagation.

the model elevations at the given location (e.g. HODGSON & BRESNAHAN 2004, HYYPÄÄ et al. 2005). Such method has a major drawback in the fact that the estimated vertical accuracies cannot be generalized to the rest of the DEM. They remain highly correlated to the site conditions such as slope, undergrowth, and vegetation cover as well as the mission parameters such as employed technology, flying height, equipment, etc.. The controls utilizing independent airborne surveys, e.g. photogrammetry may be more sophisticated and robust (HÖHLE & HÖHLE 2009). Nevertheless, as good as they are, they apply only to the studied sample. Therefore, there is generally no guarantee that the estimated accuracy extends to all parts of the model.

Optimally, a DTM quality analysis should take into account the precision, absolute and relative accuracy of the initial sampling points. Hence, a quality measure should also consider the surface sampling variations (point density) and spatial distribution of the point accuracy. This study presents a novel procedure that enables the computation of height reliability indexes for each elevation of a DTM and the subsequent generation of a DTM quality map that encapsulates all important factors. The method requires that the two following conditions are met:

- Accuracy information for each ground point (represented by σ_x , σ_y , σ_z) involved in DTM generation is correctly determined and available. For a point-cloud generated by airborne laser scanning (ALS) the proposed procedure is that by (SCHAER et al. 2007).
- The DTM is represented as a regular raster (Fig. 1) with the elevation values calculated by projecting the cell-center coordinates on the corresponding facet of the triangulated irregular network (TIN) whose nodes are the irregular sampled ground points as depicted (section 4).

The conditions of obtaining reliable estimate of σ_x , σ_y , σ_z for each ground control depend mainly on the reliability of trajectory estimation with GNSS/INS observation. The latter is strongly influenced by the (lack of) redundancy in satellite constellation (e.g. number of used satellite system, visible satellite vehicles and their geometry, recorded fre-

quencies), number of base-stations and their separation as well as in inertial observation (e.g. redundant IMUs). Although such possibilities exist (SKALOUD 2007), they are rarely exploited in practice and this theme is beyond the scope of this paper. Hence, depending on the actual observations and methods used for the trajectory determination, the required σ_x , σ_y , σ_z can represent either absolute or relative accuracies. In case of the latter, it is recommended to employ some of the previously mentioned methods utilizing ‘ground-truth’ as an external control (despite its limitation), otherwise the methodology presented in the following remains unaffected.

In the remainder of this paper, we first present a summary of factors influencing DTM accuracy (section 2). This analysis serves as a prerequisite for the subsequent layout of the presented estimation procedure that starts with the assessment of target accuracy (section 3). Afterwards, a methodology is portrayed that transforms the accuracy of individual targets within a laser point-cloud to a height reliability index of a DTM-raster (section 4). The algorithm for computing height reliability index for all raster cells for its representation as DTM quality map is listed in detail within section 5. Finally, two examples are given that explore the usage of DTM quality maps coded as metadata with the elevation-model (section 5).

2 Factors influencing DTM Accuracy

For the generation of DTMs from ALS data, the required processing steps, the associated error sources and the possibilities to estimate these errors can be summarized as follows (see Fig. 2):

- *Point-cloud creation:* The laser data and the trajectory are merged to obtain a point-cloud in a desired datum. The accuracy of the individual point can be assessed by single point error propagation (section 3), whilst the raw point density can be measured by a density map (SCHAER et al. 2009)
- *Ground classification:* The density of the remaining ground points after classification has a very strong impact on the final

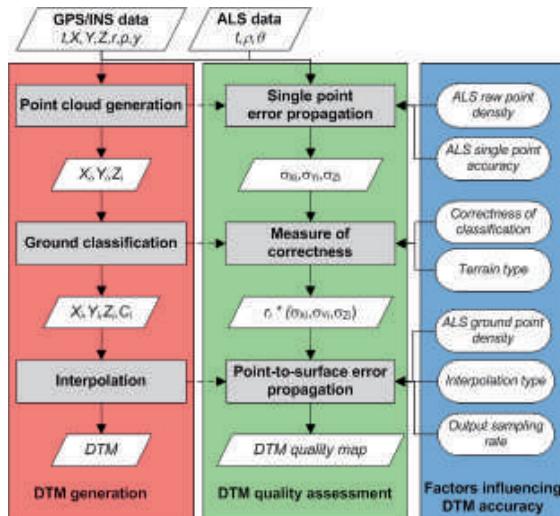


Fig. 2: General workflow for DTM production from airborne laser scanning with suggested quality indicators.

DTM quality. For example, HYYPÄ et al. (2005) emphasizes the impact of vegetation on DTM accuracy, as dense canopy strongly degrades the ground penetration capacity of the laser beam. Therefore, independently of the applied classification algorithm, the density and spatial distribution of the ground points mainly depend on the topography and land cover of the scanned area. Another important factor is the correctness of the classified points. For instance, if only a single laser point situated on a tree is wrongly classified as ground point, this may influence the resulting DTM elevations over a large area. Ideally, the correctness of the classification should be measured by some sort of confidence factor r_i for each laser point. However, this remains a very challenging task, as actually no algorithm is capable of correctly classifying all points and deliver additional confidence information. Hence, the correctness of the ground classification is often controlled by visual inspection of the resulting surface.

- *Interpolation:* In the final step of DTM processing, the individual points are connected to a continuous surface function describing the elevation for each location within the perimeter. To correctly assess the influence of each laser point on the interpolated surface, the interpolation should ideally be ac-

companied by some point-to-surface error propagation process. This process should consider on the one side the input variance of the node points and on the other side the actual sampling density. The latter shall determine if the newly computed surface values are interpolated, i.e. the actual spatial-point density is higher than required by the model, or extrapolated, i.e. the actual spatial-point density is lower than required by DEM.

3 Assessment of Target Accuracy

In SCHAER et al. (2007) we have suggested summarizing all components contributing to a single laser-return into a unique quality attribute. Such ‘q-indicator’ is constructed as accumulation of random errors coming from the error propagation of laser georeferencing equation and the analysis of scanning geometry. Fig. 3 depicts the workflow for this computation process.

Firstly, the error propagation is carried out using the navigation and laser-system data and their accuracy estimates. Secondly, the point-cloud is generated in an arbitrary mapping system, followed by spatial indexing. After the computation of the local normal vec-

tor and curvature for each point, the dataset is pre-filtered using local-covariance analysis, removing all points above a certain curvature threshold (PAULY et al. 2002). The next step performs the scanning geometry analysis, using the estimated local terrain normal, the laser direction and the beam divergence to compute the 3D footprint for the remaining laser points. Finally, the estimated effects of the scanning geometry (σ_{geom}^2) are combined with the previously estimated position-covariance (C_{nav}) to construct one unique quality indicator by (1) as suggested by SCHAER et al. (2007). Thus, every laser point receives a separate q -indicator value that not only reflects the quality of georeferencing but also the scanning geometry.

$$q_i = \sqrt{\text{trace}(C_{nav(xyz)_i}) + \sigma_{geom(x,y)_i}^2 + \sigma_{geom(z)_i}^2} \quad (1)$$

As we have shown in SCHAER et al. (2009), it is feasible to estimate such indicator directly in the flight when the real-time georeferencing is implemented. The subsequent classification process can also be automated as its possible imperfections have little influence on the esti-

mated geometry of scanning. In off-line processing, however, more sophisticated as well as more computation-resources demanding classification algorithms can be applied. Their performance is mostly influenced by the terrain slope and the complexity of the scene as concluded in a comprehensive study conducted by SITHOLE & VOSSELMAN (2004). Same report states that while most of the classification filters work well in gently sloped terrain with small buildings and sparse vegetation, in more complex scenes e.g. city-scapes with many discontinuities, the surface-based filters tend to provide better results. On the other hand, the correctness of vegetation classification improves substantially with the latest generation of the laser-scanners employing full wave-length processing (on-line or off-line). Nevertheless, the quality of filtering is difficult to quantify as it depends strongly on the processing experience and judicious choice of algorithms per terrain (and scanner) type. Therefore, we will assume in the sequel that the classification reliability is either homogenous, or can be expressed by a function of terrain type.

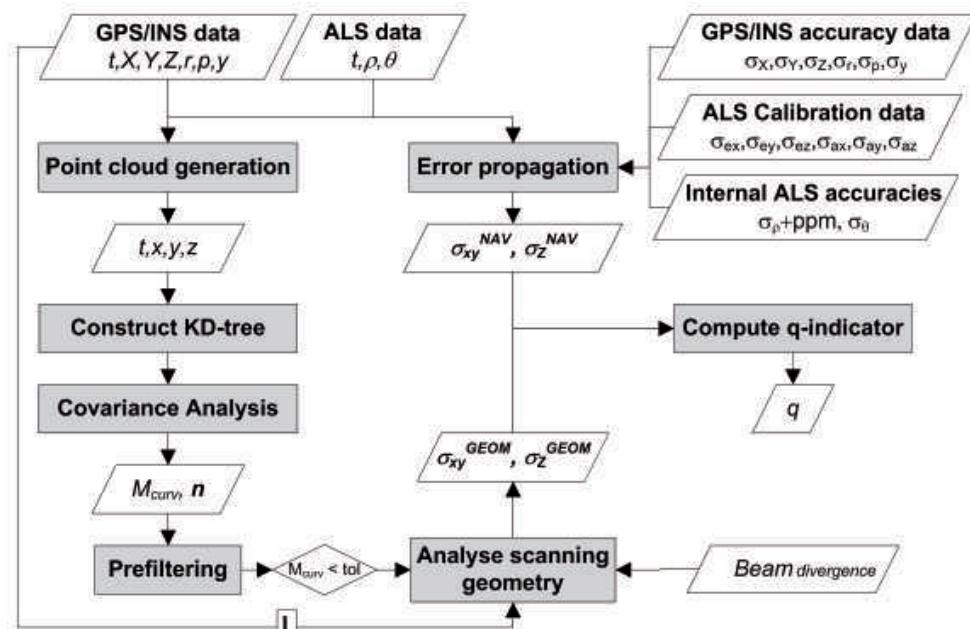


Fig. 3: General workflow for the computation of the q -indicator.

4 Computation of Height Reliability Index

This section describes in detail the procedure for the computation of DTM raster and DTM quality maps based on a point-cloud of known accuracy. We start with the linear interpolation of regular-grid (i.e. raster) elevations based on the triangulated surface (TIN), whose existence is the pre-requisite for the proposed methodology (section 1). An overview of techniques for constructing TIN from the individual points can be found, for instance, in EL-SHEIMY et al. (2005).

4.1 Interpolation of Height

Let us consider the plane equation (described by coefficients a , b , c , d) for a facet with nodes a , b , c of a TIN (Fig. 4):

$$ax + by + cz - d = 0, \text{ where } \mathbf{n} = \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{pmatrix} \quad (2)$$

is the normal vector of the facet that can be computed from the node coordinates, coordi-

nates \mathbf{a} (x_a, y_a, z_a), \mathbf{b} (x_b, y_b, z_b) and \mathbf{c} (x_c, y_c, z_c) as:

$$\mathbf{n} = (\mathbf{c} - \mathbf{a}) \times (\mathbf{b} - \mathbf{a})$$

$$\begin{pmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (y_c - y_a)(z_b - z_a) - (z_c - z_a)(y_b - y_a) \\ (z_c - z_a)(x_b - x_a) - (x_c - x_a)(z_b - z_a) \\ (x_c - x_a)(y_b - y_a) - (y_c - y_a)(x_b - x_a) \end{pmatrix} \quad (3)$$

Using (2) first for evaluating d at the node \mathbf{a} (i.e. $d = n_x x_a + n_y y_a + n_z z_a$), the height value z_i for a given 2D coordinates (x_i, y_i) can be again computed from (2) as:

$$z_i = (d - n_x x_i - n_y y_i) / n_z \quad (4)$$

4.2 Error Propagation

Applying the law of error propagation to (4), the direct estimate of the elevation accuracy of z_i can be formulated such as:

$$\sigma_{z_i}^2 = \mathbf{f}_i \mathbf{C}_{ll} \mathbf{f}_i^T \quad (5)$$

where the vector \mathbf{f}_i can be constructed as the partial derivatives of (4) and the node coordinates:

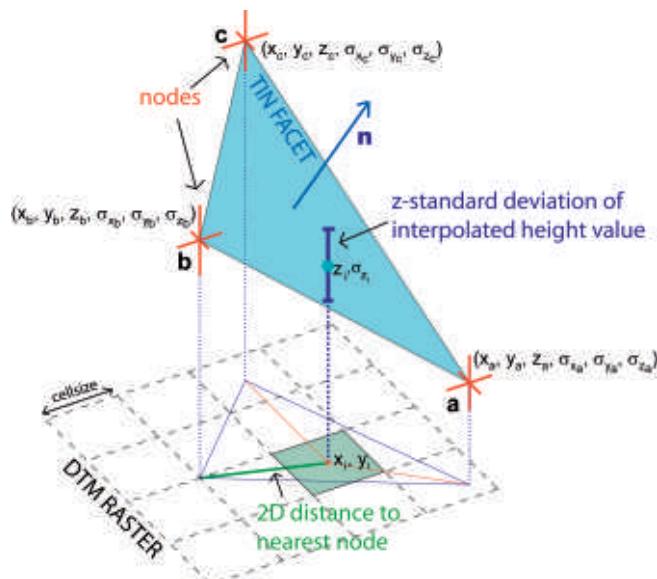


Fig. 4: Propagation of individual point errors to DTM height by TIN interpolation.

$$\mathbf{f}_i = \left[\frac{\partial z_i}{\partial x_a} \frac{\partial z_i}{\partial y_a} \frac{\partial z_i}{\partial z_a} \frac{\partial z_i}{\partial x_b} \frac{\partial z_i}{\partial y_b} \frac{\partial z_i}{\partial z_b} \frac{\partial z_i}{\partial x_c} \frac{\partial z_i}{\partial y_c} \frac{\partial z_i}{\partial z_c} \right] \quad (6)$$

The stochastic model \mathbf{Q}_{ll} is constructed using the variance information for each node:

$$\mathbf{Q}_{ll} = \underset{9 \times 9}{diag} \left[\sigma_{x_a}^2 \ \sigma_{y_a}^2 \ \sigma_{z_a}^2 \ \sigma_{x_b}^2 \ \sigma_{y_b}^2 \ \sigma_{z_b}^2 \ \sigma_{x_c}^2 \ \sigma_{y_c}^2 \ \sigma_{z_c}^2 \right] \quad (7)$$

4.3 Variance scaling

Depending on the raster-cell size ($cell_{sz}$ in (9)), it can be determined whether the newly computed elevation value is based on interpolation or extrapolation. The Nyquist-Shannon sampling theorem states that if a function contains no frequencies higher than f , it can be completely reconstructed by points spaced $1/f$ apart. Adopting this theorem to DTM generation, it can be deduced that an original sampling of half cell-size is needed to correctly describe the terrain features of the given output frequency (in our case $cell_{sz}$). According-

ly, if a pixel centre coordinate is closer than $cell_{sz}/2$ to the initial node, the new value can be assumed as correctly interpolated. Hence, the terrain features at the output sampling rate are correctly represented. If the distance is larger than $cell_{sz}/2$, the height is supposed to be extrapolated. To incorporate this interpolation-extrapolation process into the DTM quality analysis, the 2D distance (d_{min}) of the pixel centre coordinates (X_i, Y_i) to the nearest node (see Fig. 4) is computed:

$$d_{min} = \min \langle \Delta \mathbf{a}_{2D}, \Delta \mathbf{b}_{2D}, \Delta \mathbf{c}_{2D} \rangle$$

where

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{a}_{2D} &= \|x_i - x_a, y_i - y_a\| \\ \Delta \mathbf{b}_{2D} &= \|x_i - x_b, y_i - y_b\| \\ \Delta \mathbf{c}_{2D} &= \|x_i - x_c, y_i - y_c\| \end{aligned} \quad (8)$$

The d_{min} parameter is applied to scale the computed height accuracies by the factor s to produce a height reliability index r_z :

$$r_z = \sqrt{s \sigma_{z_i}^2} \begin{cases} s = \frac{d_{min}}{c} + 0.5, & \text{if } d_{min} \leq \frac{cell_{sz}}{2} \\ s = 2 \frac{d_{min}}{c}, & \text{if } d_{min} > \frac{cell_{sz}}{2} \end{cases} \quad (9)$$

Tab. 1: Computation algorithm for DTM quality map.

DTMQUAL

```

Require: TIN with n facets, list FACET (3 x n) with indexes of node points
Require: List NODE (6 x m) with m node points with coordinates ( $x_p, y_p, z_p$ ) and standard deviation
( $\sigma_{x_p}, \sigma_{y_p}, \sigma_{z_p}$ )
Require: DTM and DTMQUAL with raster origin ( $X_{UL}, Y_{UL}$ ), cell-size ( $cell_{sz}$ ), and grid dimension
( $x_{dim}, y_{dim}$ )
for row = 1 :  $x_{dim}$  do
    for col = 1 :  $y_{dim}$  do
        [ $X_p, Y_p$ ] = GetMapCoordinates(row, col,  $X_{UL}, Y_{UL}, c$ ) {Compute map coordinates corresponding to
        centre of raster cell row, col}
         $n_i$  = FindCorrespondingFacet(TIN,  $X_p, Y_p$ ) {find TIN facet that includes coordinates of cell centre}
         $I$  = FACET[ $n_i$ ] {extract indexes of node points  $\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c}$ }
        for k = 1 : 3 do
            NodeCoordinates[k, :] = NODE[I[k], 1 : 3] {extract node coordinates [x, y, z]}
            NodeSTD[k, :] = NODE[I[k], 4 : 6] {extract node standard deviations [ $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ ]}
        end for
        DTM[row, col] = InterpolateHeight(NodeCoordinates,  $X_p, Y_p$ ) {apply eq. 4 to compute height value}
        DTMQUAL[row, col] = ComputeHeightReliabilityIndex(NodeSTD,  $X_p, Y_p, cell_{sz}$ )
        {apply eq. 5 to eq. 9 to compute height reliability index}
    end for
end for

```

5 Computation of DTM Quality Map

The process of computing the DTM quality map by extending the computation of height-reliability index to all cells is outlined by the pseudo-code listed in Tab 1.

Both, DTM interpolation and height reliability index computation are carried out in the same process for most optimal computation performance. The height reliability index r_z is computed for every grid cell of the DTM and is stored to a separate georeferenced raster called DTMQUAL in the pseudo-code.

6 Use of DTM Quality Maps

6.1 Metadata Generation

Fig. 5d shows such a quality map computed for an ALS point-cloud where the distribution of automatically classified ground points (see Fig. 5a) is very disparate and contains important data gaps, i.e. due to dense vegetation and water cover. The triangulation process is closing these data gaps (see Fig. 5b). In these areas, the derived DTM values (Fig. 5c) are distant from the initial node points. They cannot be considered as trustful as they are the result of an extrapolation process. Due to the scaling of the height variance (σ_z^2) yielding the height reliability index r_z (see (9)), the final

quality map reflects (Fig. 5d) the reliability deterioration for such areas. The insufficient sampling density may be caused by flying parameters, e.g. large height or speed above the surface versus LiDAR pulse-repetition rate, or by poor surface reflectance. Obviously, there is a less of problem if the pulse absorption is caused by a water surface as this part of surface is essentially flat, see upper part of DTM, as compared to other material where height varies e.g. glacier, crops, and man-made surfaces. Such differences are visually apparent and their distinction can also be automated. Nevertheless, the water-surfaces were intentionally left in this example to highlight the influence of spatial sampling on the determination of the height-reliability index.

The visual inspection of the hill-shaded DTM (Fig. 5c) allows identifying several wrongly classified points that can be seen as single peaks in pyramidal form (marked yellow in figure). As the slope of these incorrect TIN facets is normally much steeper than the slope of their neighbours, the resulting height variance using (5) is much larger. This enables highlighting such areas of incorrectly classified points, as they appear as zones with decreased height accuracy (dark red). Accordingly, such quality maps can be employed as quality metadata associated to the DTM. Such metadata indicate areas where the DTM values are reliable and areas where they should be considered with precaution.

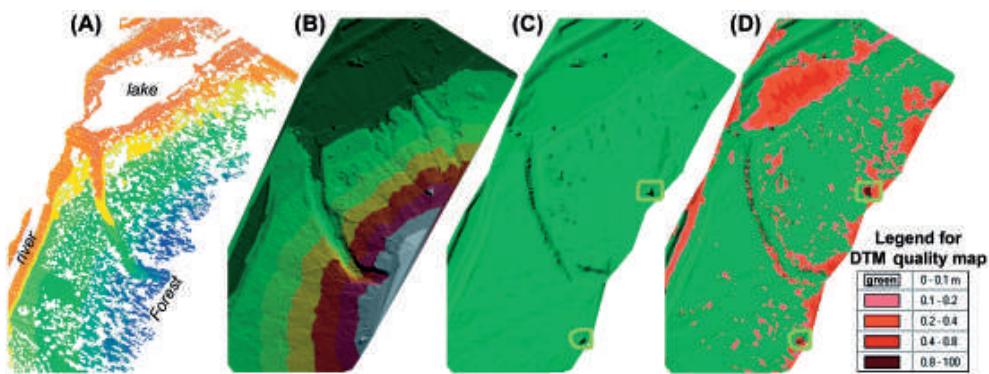


Fig. 5: (A) Automatically classified ground points colour-coded by elevation, (B) DTM-TIN, (C) DTM raster interpolated from TIN, (D) DTM quality map superposed on DTM colour-coded by index r_z (cells with $r_z < 0.1$ are transparent, i.e. correspond to the green-shaded surface).

6.2 DTM Data Fusion

The availability of a DTM quality map allows constructing weighting schemes for DTMs generated by merging data of different sources and accuracies e.g. WARNIER & MANDLBURGER (2005). Merging two DTMs (DTM_1 and DTM_2) can be expressed as follows:

$$DTM_{12}[x, y] = \frac{w_1 \cdot DTM_1[x, y] + w_2 \cdot DTM_2[x, y]}{w_1 + w_2} \quad (10)$$

As shown in Fig. 6, the respective weights w_1 and w_2 for each position x, y are computed as the inverse of the squared DTM reliability index r_z (computed by (9)) values of the respective DTM quality maps ($QDTM_1$ and $QDTM_2$):

$$\begin{aligned} w_1[x, y] &= \frac{1}{QDTM_1[x, y]^2}, \\ w_2[x, y] &= \frac{1}{QDTM_2[x, y]^2} \end{aligned} \quad (11)$$

Additionally, applying the laws of error propagation, the height accuracies of the merged rasters can be estimated. The values of the merged DTM quality map ($QDTM_{12}$) for a given location x, y follows from (10) and (11) by the law of error propagation and therefore can be computed via the following formula:

$$QDTM_{12}[x, y] = \sqrt{\left(\frac{1}{QDTM_1[x, y]^2} + \frac{1}{QDTM_2[x, y]^2} \right)^{-1}} \quad (12)$$

7 Conclusions

Despite the complexity of the airborne laser scanning, we are convinced of the feasibility of considering all the stochastic processes of the underlying technologies and estimating a reliability of the reconstructed DTM from the data itself. In this paper we have extended the previous research in assessing the accuracy of individual targets within a laser point-cloud. Applying the laws of error propagation we have combined these accuracies together with spatial distribution and presented a concept of a quality map that can be associated as metadata to the DTM. These quality maps indicate areas where the height values are reliable and areas where they should be considered with a precaution. These maps reflect the dynamic nature of the acquisition process and can be a valuable asset when estimating the accuracy of DTM derived quantities, i.e. slope, aspects. Moreover, the availability of such cell-wise quality indicators allows constructing weighting schemes also for DTMs generated

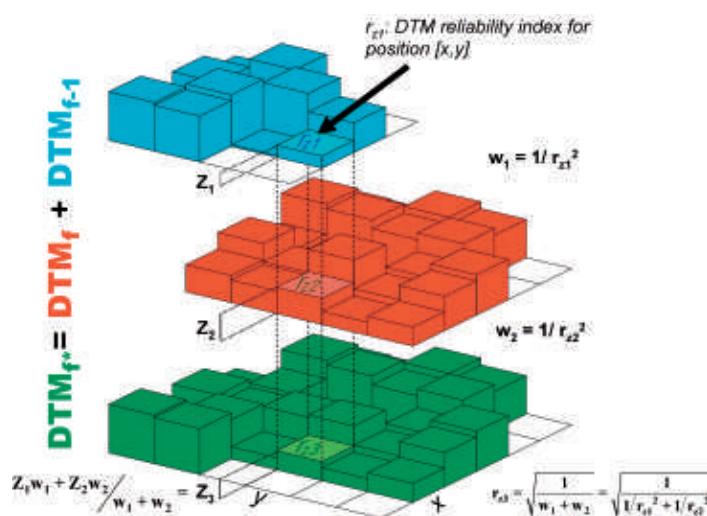


Fig. 6: Example for DTM grid merge weighted by DTM reliability index.

by merging data from different sources and estimating the accuracies of the results.

Acknowledgements

This work was significantly funded by the Swiss Commission for Innovation (CTI/KTI Project 7782 EPRP) in collaboration with BSF Swissphoto.

References

- ARTUSO, R., BOVET, S. & STREILEIN, A., 2003: Practical methods for the verification of country wide terrain and surface models. – *Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* **34** (3): 1419–1425.
- CSANYI, N. & TOTH, C., 2007: Improvement of LiDAR data accuracy using LiDAR-specific ground targets. – *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* **73** (4): 385–396.
- DROI, I., 2008: Improving the accuracy of digital terrain models. – *Studia Univ. Babes-Bolyai, Informatica* **LIII** (1): 65–82.
- GLENNIE, C.L., 2007: Rigorous 3D error analysis of kinematic scanning Lidar systems. – *Journal of Applied Geodesy* **1** (1): 147–157.
- EL-SHEIMY, N., VALEO, C. & HABIB, A., 2005: Digital terrain modeling. – Artec House, Boston, Mass., USA.
- HABIB, A., BANG, K., KERSTING, A.P. & LEE, D.C., 2009: Error budget of lidar systems and quality control of the derived data. – *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* **75** (3): 1093–1108.
- HODGSON, M.E. & BRESNAHAN, P., 2004: Accuracy of airborne LiDAR derived elevation: empirical assessment and error budget. – *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* **70** (3): 331–333.
- HÖHLE, J. & HÖHLE, M., 2009: Accuracy assessment of digital elevation models by means of robust statistical methods. – *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **64** (4): 398–406.
- HYYPÄÄ, H., YU, X., KAARTINEN, H., KAASALAINEN, S., HONKAVAARA, E. & RÖNNHOLM, P., 2005: Factors affecting the quality of DTM creation in forested areas. – *ISPRS WG III/3–4, V/3 on “Laser scanning 2005”*, Enschede, Netherlands, 12–14.
- KÄGER, H., 2004: Discrepancies between overlapping laser scanning strips – simultaneous fitting of aerial laser scanner strips. – *Proceedings of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing XXth Congress, Istanbul* **34** (B/1): 555–560.
- KAREL, W., PFEIFER, N. & BRIESE, C., 2006: DTK quality assessment. – *Proceedings of ISPRS Technical Commission II Symposium*, Vienna, Austria, 7–12.
- LATYPOV, D., 2002: Estimating relative LiDAR accuracy information from overlapping flight lines. – *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **56** (4): 236–245.
- PAULY, M., GROSS, M. & KOBBELT, L.P., 2002: Efficient simplification of point-sampled surfaces, *IEEE Conference on Visualization*, Boston.
- SCHAER, P., SKALOUD, J., LANDTWING, S. & LEGAT, K., 2007: Accuracy estimation for laser point-cloud including scanning geometry. – *ISPRS 5th International Symposium on Mobile Mapping Technology (MMT2007)*, Padova, Italy, 28–31.
- SCHAER, P., SKALOUD, J., STEBLER, Y., TOME, P. & STENGELE, R., 2009: Airborne LiDAR in-flight accuracy estimation. – *GPS World* **20** (8): 37–41.
- SKALOUD, J., 2007: Beyond the Achilles' Heel of Modern Airborne Mapping. – FRITSCH, D. (ed.): *Photogrammetric Week*, Stuttgart, 227–241.
- SIRTHOLE, G. & VOSSELMAN, G., 2004: Experimental comparison of filter algorithms for bare-Earth extraction from airborne laser scanning point-clouds. – *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **59** (2004): 85–101.
- WARNIER, T. & MANDLBURGER, G., 2005: Generation a new high resolution DTM product from various data sources. – *Proceedings of Photogrammetric Week 05*, Stuttgart, 8–10.

Addresses of the Authors:

Dr.-Ing. JAN SKALOUD, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Geodetic Engineering Laboratory (TOPO), 1015 Lausanne, Tel.: +41-21-693-2753, Fax: +41-21-693-5740, e-mail: jan.skaloud@epfl.ch

Dr.-Ing. PHILIPP SCHAER, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Geodetic Engineering Laboratory (TOPO), 1015 Lausanne, e-mail: philipp.schaer@a3.epfl.ch

Manuskript eingereicht: November 2011
Angenommen: Januar 2012



A Process for Radiometric Correction of UAV Image Blocks

EIJA HONKAVAARA, TEEMU HAKALA, LAURI MARKELIN, TOMI ROSNELL, MASALA, HEIKKI SAARI & JUSSI MÄKYNNEN, Espoo, Finland

Keywords: Reflectance, radiometry, geometry, calibration, UAV, hyperspectral

Summary: The objective of this investigation is to develop and test a radiometric correction process for UAV image blocks. The phases of the process include the laboratory calibration of the sensor and the radiometric correction of the campaign image data. This investigation focuses on developing a process for radiometric correction of the image data collected during a remote sensing campaign. First of all, the orientations for the images are determined using the self-calibrating bundle block adjustment method and an accurate DSM is generated by automatic image matching. The varying radiometric level of images due to changes in illumination and the instability of the sensor are eliminated using a relative radiometric block adjustment technique. Optional reflectance reference observations can be used to adjust the data to absolute reflectance units. The process was demonstrated and evaluated by using two UAV imaging systems: a consumer camera-based system and a novel Fabry-Perot interferometer-based next generation lightweight hyperspectral imaging system. The method improved the homogeneity of the data, but some drift also appeared in the parameters. The first experiment provided 0.003–0.008 reflectance errors in the areas close to the radiometric control points (mostly on the level of 5 % of the reflectance value). The presented approach provides a general framework for rigorous radiometric correction of UAV image blocks, and the novel technology provides many possibilities for the further development of the method. Our results also show that hyperspectral stereophotogrammetry is now possible with UAV imaging sensors weighing less than 500 g.

Zusammenfassung: Verfahren zur radiometrischen Korrektur von UAV Bildblöcken. Das Thema der vorgestellten Untersuchung ist die Entwicklung und der Test eines Korrekturverfahrens für die Radiometrie eines Bildblocks, der mit kleinen unbemannten Flugzeugen aufgenommen wurde (UAVs = Unmanned Aerial Vehicles). Das Verfahren umfasst die Laborkalibrierung der Kamera und die radiometrische Korrektur der bei der Befliegung aufgenommenen Bilddaten, und ist vor allem auf fernerkundliche Anwendungen ausgerichtet. Im ersten Schritt werden die Bilder über eine Aerotriangulation verknüpft, wobei die Parameter der inneren Orientierung mitgeschätzt werden (Selbstkalibrierung). Dann folgt die Ableitung eines digitalen Oberflächenmodells. Die radiometrischen Unterschiede zwischen den einzelnen Bildern bedingt durch Beleuchtungsunterschiede und Instabilität des Sensors werden durch ein neues Verfahren zur relativen radiometrischen Blockausgleichung entfernt. Optional können Referenzreflektanzen eingeführt werden, um auf diese Weise den aufgenommenen Daten absolute Reflektanzwerte zuordnen zu können.

Das Verfahren wurde mit Bilddaten zweier auf UAVs betriebener Systeme erprobt. Es handelt sich einerseits um eine Consumer-Kamera und andererseits um eine neue Hyperspektralkamera von Fabry-Perot, die sich durch geringes Gewicht und die Nutzung der Interferometrie auszeichnet. Die Anwendung unseres Verfahrens ließ zwar homogenerne Bilddaten entstehen. Gewisse Drifteffekte blieben aber bestehen. Die ersten Untersuchungen zeigten einen RMS-Fehler von 0.003–0.008 der Reflektanzeinheit im Bereich der radiometrischen Passpunkte, meistens in der Größenordnung von 5 % der Reflektanzwerte. Das vorgestellte Verfahren bietet einen Rahmen für eine durchgreifende radiometrische Ausgleichung von Bilddaten, die von UAV-Plattformen aufgenommen werden. Neue Technologien, z. B. der Sensoren, lassen viele weitere Entwicklungen erwarten. Unsere Ergebnisse zeigen, dass hyperspektrale Stereophotogrammetrie von UAVs heute möglich ist, wenn die Sensoren leichter als 500 g sind.

1 Introduction

Low-cost and low-weight UAV imaging systems offer great potential for local area remote sensing applications, such as applications for agriculture, forestry, the mining industry and hydrology, as well as for scientific research. To obtain a good reconstruction of the object, images are collected in a block structure with large forward and side overlaps. The multiple observations per image point are of great importance in order to improve the reliability of the data processing and interpretation (LEBERL et al. 2010). Multiple image overlaps are widely used in the geometric processing of images, including the bundle block adjustment methods and surface reconstruction, but there are not yet well-established processes for utilizing the multiple overlaps in radiometric processing for UAV applications.

The idea of radiometric block adjustment is not new. A rigorous method for combining geometric and radiometric object reconstruction, called the global object reconstruction method, was already presented by EBNER & HEIPKE (1988) several decades ago. Unfortunately, the method turned out to be computationally laborious, and in practical applications the geometry and radiometry are processed separately.

Recently, approaches have been established for the radiometric block adjustment and reflectance image generation of image block data collected by stable, large-format digital photogrammetric cameras (CHANDELIER & MARTINOTY 2008, COLLINGS et al. 2011, LÓPEZ et al. 2011). For photogrammetric images, approaches that are based on the radiative transfer theory and that do not account for the overlaps in airborne image blocks have also been developed (BEISL et al. 2008, RICHTER & SCHLÄPFER 2002). In UAV remote sensing applications, empirical line-based approaches are typically used (BERNI et al. 2009), or then simple balancing approaches are used (ZHOU 2009); the analysis is carried out using the central areas of the images. HAKALA et al. (2010) developed a UAV-based method for accurate measurement of the reflectance anisotropy of surfaces, but this method required reflectance reference targets in each image, which is not appropriate in many practical operational re-

mote sensing campaigns; also, other methods for the anisotropy measurements are currently being developed (GRENZDÖRFFER & NIEMEYER 2011).

The radiometric correction is one step in the UAV remote sensing process. The central phases of the image production process include the laboratory calibration of the sensor, data collection, orientation of the images, digital surface model (DSM) generation, radiometric correction and the calculation of the final end products, such as radiometrically corrected images and orthophoto mosaics. The corrected images are utilized in the remote sensing applications.

The objectives of this investigation are to develop a method for radiometric correction and reflectance image generation for UAV imaging that utilizes multiple overlaps in the image block and to demonstrate its use with novel imaging systems. In section 2, the theoretical background of the radiometric correction method is described. In section 3, we describe the set-up for the empirical investigation; we give the results in section 4 and discuss our findings in section 5.

2 Novel Radiometric Correction Method

2.1 Theoretical Background

In passive UAV imaging, the elementary components of radiance entering the sensor (L_{at_sensor}) are the radiance components from the object of interest, mainly the surface-reflected solar radiance (L_s), skylight (L_{sky}), background radiance (L_{bg}) and the radiance reflected first by the background objects and then by the atmosphere (L_{bg_multi}); the adjacency effect (L_{adj}) and atmospheric path radiance (L_{atm}) are radiance components that do not carry any information about the object of interest (SCHOTT 2007):

$$L_{at_sensor} = L_s + L_{sky} + L_{bg} + L_{bg_multi} + L_{adj} + L_{atm} \quad (1)$$

The contributions of different radiation components in (1) are dependent on the flying height, the atmospheric state, the reflectance

properties of the object of interest and the reflectivity of the surrounding objects; more details can be found in von SCHÖNERMARK et al. (2004) and SCHOTT (2007).

In this investigation we collected the data in direct sunshine in a flat and open area, so the surface-reflected direct solar radiance is the dominating component:

$$L_s(\lambda, \theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) = \rho(\lambda, \theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) \tau_s(\lambda) \tau_v(\lambda) E_\lambda^0 \cos \theta / \pi \quad (2)$$

where τ_s and τ_v are the atmospheric transmittance in the solar path and in the path from object to sensor, respectively, E_λ^0 is the spectral irradiance on top of the atmosphere and θ is the solar incidence angle on a surface ($\cos \theta$ is given by the vector dot product of the unit vector pointing towards the Sun and the unit vector normal to the surface). θ_i and θ_r are the illumination and reflected light (observation) zenith angles and φ_i and φ_r are the azimuth angles, respectively. $\rho(\lambda, \theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r)$ is the bi-directional reflectance distribution function (BRDF) (von SCHÖNERMARK et al. 2004).

The sensor properties define how the incoming radiation is measured. The digital grey value (DN) of a given pixel, after applying dark pixel subtraction and correcting sensor-related radiometric non-uniformities, can be given as follows:

$$DN = GA_d \Omega \tau \int_0^\infty L_{at-sensor}(\lambda) S(\lambda) d\lambda \quad (3)$$

where G is the system gain, A_d is the area of the detector, Ω is the aperture, τ is the integration or exposure time, $S(\lambda)$ is the system-level spectral response and λ is the wavelength. Depending on the sensor, the DN value can be controlled by the exposure time, by the aperture and exposure time or by the aperture, by the exposure time and by the ISO setting (ROSNELL et al. 2011). In the following discussion, it is assumed that band-averaged values are being used.

The equation for the reflectance in sun-illuminated conditions with contributions from the path radiance is

$$\rho(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) = (\pi(c_0 + c_1 DN) - L_{atm}) / (\tau_s \tau_v E^0 \cos \theta) \quad (4)$$

where c_0 and c_1 are the absolute radiometric calibration parameters of the sensor when relating the DNs to L_{at_sensor} . The reflectance can be solved by physically or empirically based methods (HONKAVAARA et al. 2009). In low-altitude applications, a linear approximation (empirical line method) is a feasible approach for the reflectance product generation (SCHOWENGERDT 2007), and this is the basis for the development of the method in this investigation:

$$\rho(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) = c'_0 DN + c'_1 \quad (5)$$

where c'_0 and c'_1 are modified calibration coefficients, which are dependent on illumination, the atmosphere and sensor-related factors ((1) and (4)).

2.2 A Process for UAV Image Block Radiometric Correction

The empirical model for the conversion of object reflectance to DN is

$$DN_j = a_{abs} R_j(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) + b_{abs} \quad (6)$$

where $R_j(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r)$ is the bi-directional reflectance factor (BRF) of the object j and a_{abs} and b_{abs} are the parameters of the empirical line model (a reflectance factor is used because it is a measurable quantity (SHAEPMAN-STRUB et al. 2006)).

The DN value of the same point is different in different overlapping images. In an image block, this is partially caused by the anisotropic characteristic of object reflectance, which is the physical property of the object. Other important factors causing differences include the changes in illumination conditions and the inaccuracy of the exposure of the sensor and other sensor inaccuracies. While the anisotropy of the reflectance is modelled by the BRDF, the relative differences in the overlapping images must be estimated. In this study we used a linear model to model these differences; the extended model for image i and object j is

$$\begin{aligned} DN_{ij} &= a_{rel_i}(a_{abs} R_j(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) + b_{abs}) + b_{rel_i} \\ &= a_{rel_i} a_{abs} R_j(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) + a_{rel_i} b_{abs} \\ &\quad + b_{rel_i} \end{aligned} \quad (7)$$

The corresponding observation equation for DN of object j in image i , with a correction v_{ij} , is

$$v_{ij} = a_{rel_i} a_{abs} R_j(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) + a_{rel_i} b_{abs} + b_{rel_i} - DN_{ij} \quad (8)$$

The observation equation for the radiometric control point with a reflectance observation, $R_{obs_j}(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r)$ and a correction v_j , is

$$v_j = R_j(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) - R_{obs_j}(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) \quad (9)$$

For one of the images, the relative parameters are $a_{rel_1} = 1$, $b_{rel_1} = 0$, and the other relative parameters are relative to these parameters. Various parameterizations can be used: 1) a full linear model for absolute and relative correction, 2) a linear model for absolute correction and offset for the relative correction, 3) only relative parameters and 4) only absolute parameters. Furthermore, it is possible to estimate the radiometric object model (BRDF).

The radiometric correction process is as follows. A network of radiometric tie points is generated in the campaign area in the object coordinate system. Accurate image orientation information and DSM are needed in order to determine the DN observations. Observation equations ((8) and (9)) are generated for each image DN observation and object reflectance observation. The result is an over-determined adjustment task, which can be solved using the least squares method.

The model presented here assumes that the DNs will be corrected for sensor defects based on calibration information. Central parameters that need to be determined in the laboratory calibration include the corrections for the

lens falloff and CCD detector non-uniformity as well as the spectral response (SCHOWENGERDT 2007, SCHOTT 2007).

3 Empirical Testing

3.1 Imaging Systems

The Microdrones MD4-1000 quadrocopter UAV was used as the platform, allowing for a maximum payload of 1000 g. The imaging sensors included a hyperspectral prototype sensor developed by the VTT Technical Research Centre of Finland (MÄKYNNEN et al. 2011, SAARI et al. 2011) and a Panasonic Lumix GF1 customer micro four-thirds camera (Fig. 1). Both systems are capable of collecting stereoscopic image data.

The Fabry-Perot interferometer (FPI) based hyperspectral imaging sensor represents the next generation in imaging technology (Unmanned Aerial System Innovations, UASI) (MÄKYNNEN et al. 2011, SAARI et al. 2011). When the FPI is placed in front of the sensor, the sensitivity of each pixel is a function of the interferometer air gap. By changing the air gap, it is possible to acquire a new set of wavelengths for each image. With a sequence of images captured with different air gaps of the FPI, it is possible to reconstruct the spectrum for each pixel in the image. In this mode, up to 54 raw images can be saved to buffer memory in one image burst. The camera weighs only 450 g. The prototype uses the 5 Mpix RGB CMOS image sensor MT9P031 from APTINA (2011), and the 4×4 binned Video Graphics Array (VGA) was used in the flight campaign. Details about the camera are given in Tab. 1 and Fig. 2.

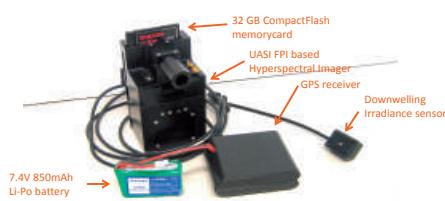


Fig. 1: Left: VTT hyperspectral camera UASI (SAARI et al. 2011). Right: Panasonic Lumix GF1 cameras.

Tab. 1: Parameters of sensors. F: focal length; FOV f, FOV cf: field of view in flight and cross flight directions.

Sensor	F (mm)	Pixel (μm)	Columns	Rows	FOV f ($^{\circ}$)	FOV cf ($^{\circ}$)	Weight (g)
UASI	0.0093	8.8	640	480	26	36	450
GF1	0.020	4.5	4016	3016	37	48	448

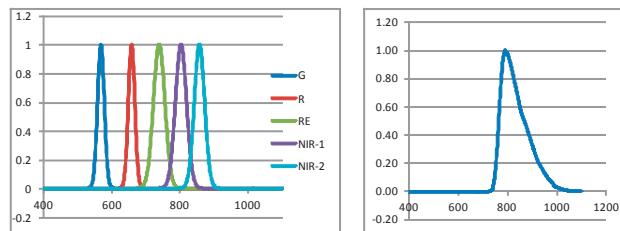


Fig. 2: Left: selected channels of hyperspectral data (central band width, full width of half maximum FWHM): G: 568.553 nm, 23.287 nm; R: 658.459 nm, 22.324 nm; Red edge (RE): 739.082 nm, 29.724 nm; NIR-1: 802.868 nm, 38.38 nm; NIR-2: 857.029 nm, 35.601 nm. Right: spectral response of the GF1.

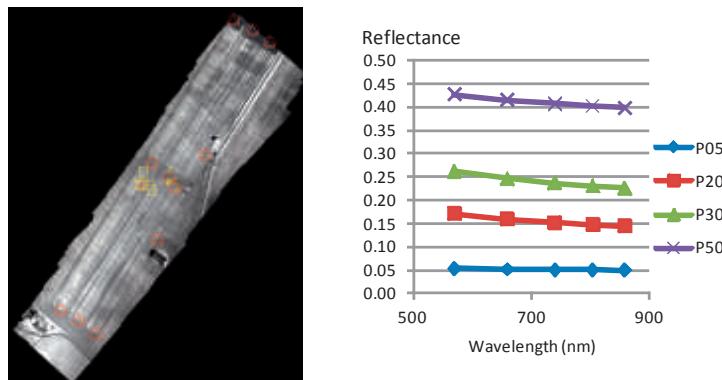


Fig. 3: Left: overview of the block: ground control points (red triangles), right: spectra of the reflectance targets for the five selected UASI channels (Fig. 2).

The Panasonic Lumix GF1 camera (LUMIX 2011) has been modified so that it works as an NIR camera (see details in Tab. 1, Fig. 2). In this study, only the pixels stored in the red channel were used.

3.2 Flight Campaigns

The image blocks collected at the MTT Agrifood Research Finland agricultural test site (N 60° 25' 21", E 24° 22' 28") on 6 July, 2011 were used to test the radiometric correction method (Fig. 3). Four reflectance reference

tarps (nominal reflectance: 0.05, 0.2, 0.3, 0.5), a Siemens star and 11 ground control points were used as reference targets. The reflectance of the reference tarps was measured using the ASD Field Spec Pro FR spectroradiometer and the measurements were normalized to a calibrated, white, 30 cm by 30 cm Spectralon reference standard from Labsphere. In this study, a single image strip from both sensors was used; the forward overlaps were 81 % and 91 % for UASI and GF1, respectively. The length of the area was approximately 500 m and the width of the image strip was approximately 80 m with UASI and 120 m with GF1.

Tab. 2: Details on the data collection (S.E: solar elevation, S.Az: solar azimuth)

Sensor	Time	f-stop	T (s)	GSD (cm)	Forward Overlap (%)	Images	S.E. (°)	S.Az. (°)
UASI	9:25	<7.0	1/300	13	81	42	45	132
GF1	11:06	5.0	1/2000	3	91	57	52	166

In the campaigns, the sensors were not operated simultaneously because a suitable camera mount was not available. The weather conditions during the campaign were fine, with almost a cloud-free sky and moderate wind (Tab. 2).

3.3 Radiometric Calibration in Laboratory

The spectral and lens fall-off calibration of the UASI were carried out at the VTT's calibration facility. The spectral calibration was carried out using a Quartz halogen lamp, a monochromator (Bentham TMc300) and a beam homogenizer and diffuser module to provide an evenly distributed narrow bandwidth light, which was projected into the hyperspectral imager optics. The calibration of the spectral radiance was performed with the aid of a United Detector QED-200 absolute radiometer for the wavelength range of 350–1050 nm using 1 nm steps and a FWHM resolution of 1 nm. After this, the UASI hyperspectral imager was attached to the setup and its signal for each wavelength was recorded at 280 FPI air gap values in the range of 100–1500 nm at 5 nm intervals. The calibration measurements were used to calculate the calibration coefficient matrix. The spectral photon flux entering the pixels of the hyperspectral imager at a fixed FPI air gap can be calculated by multiplying the Red (R), Green (G) and Blue (B) pixel signals by the calibration coefficient matrix for the whole image (MÄKYNEN et al. 2011, SAAARI et al. 2011). The lens falloff calibration of the UASI was performed using an integrating sphere and a Quartz halogen lamp to provide a uniform, wide-band radiance. The lens fall-off factor was calculated from an average of 10 raw images, from which dark images at the same exposure time were subtracted.

The radiometric camera calibration of the GF1 was carried out at the Finnish Geodetic Institute's (FGI) experimental calibration facility. The spectral calibration was carried out using a stabilized 50 W quartz tungsten halogen lamp (Thermo Oriel 66881), an Oriel Cornerstone 74125 monochromator and a diffuser. The output of the monochromator was first measured using an ASD Field Spec Pro FR spectroradiometer, which had an FWHM of 3 nm at a range of 350–1000 nm. The GF1 was then used to capture a set of images at 10 nm intervals at a range of 350–1000 nm, and the spectral response was calculated from this dataset. The lens falloff correction was determined by photographing white isotropic reference (PTFE plane of the size 1 m x 1 m in diffuse illumination conditions in cloudy weather) and fitting a \cos^n function (SCHOTT 2007) to 8 images; a value of 5.6 was obtained for n.

3.4 Data Processing

The data processing began by carrying out the image correction using correction factors determined by the laboratory calibration. The further processing was carried out in a photogrammetric environment consisting of the BAE Systems SOCET SET photogrammetric workstation (DEVENECIA et al. 2007, WALKER 2007) and in-house developed components.

The orientation determination of the GF1 images was relatively efficient. A small amount of manual interaction was necessary because the GNSS/IMU system did not provide accurate enough a priori orientation information for the SOCET SET automatic tie point determination method. Orientation determination was carried out in two phases: in the first iteration, a small number of interactively measured tie points were used to

provide satisfying approximate orientations, and in the second iteration 121 automatically measured tie points per image were computed using the SOCET SET. In self-calibrating bundle block adjustments, the principal point, radial distortions and tangential distortions were estimated. The Next Generation Automated Terrain Extraction software (NGATE) (DEVENECIA et al. 2007) was used to determine 3D point clouds. The point cloud was created with a 10 cm point interval using the default NGATE strategy (ngate.strategy with a correlation window size of 5×5 pixels). The planimetric and vertical accuracy of the georeferencing (image mosaics, point clouds and 3D point determination) was estimated to be better than 0.2 m. Examples of a GF1 image and derived point cloud are shown in Fig. 4.

The orientation processing of the UASI images followed the same principles as the processing of the GF1 images. The challenge in

processing them was that the individual channels of the spectral data cube were collected within a short period of time (in this set up, approximately in 1 s). Due to the platform movements, the individual channels do not overlap accurately, as is demonstrated in Fig. 5. In this study, 5 channels (Fig. 2) were selected from a hyperspectral data cube with 50 channels, and each channel was oriented separately. A further complication was that the adjustment appeared to be quite unstable; thus, only the first-order radial distortion parameter was used to model image distortions. Approximately 20 additional GCPs were extracted using the GF1 image block to aid the orientation. It was estimated that the accuracy of the georeferencing was better than 0.5 m for all of the coordinate components. The method for the orientation processing will be improved in the future.

The radiometric block adjustments were carried out using the methodology described

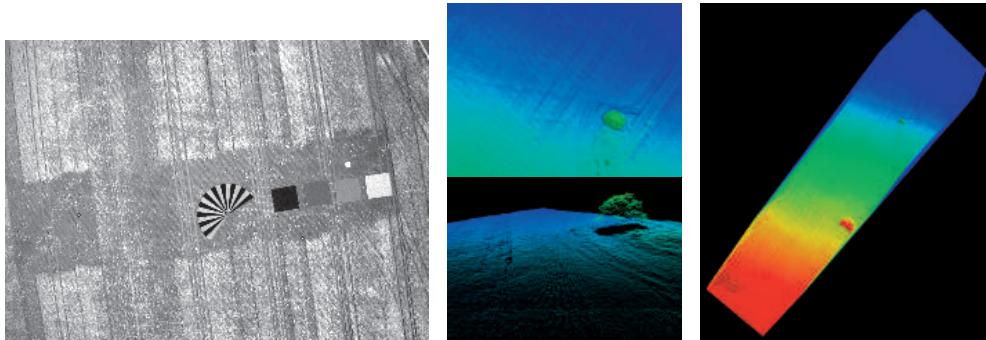


Fig. 4: Left: GF1 image, centre and right: Different views of the point cloud generated from GF1 images by automated image matching.

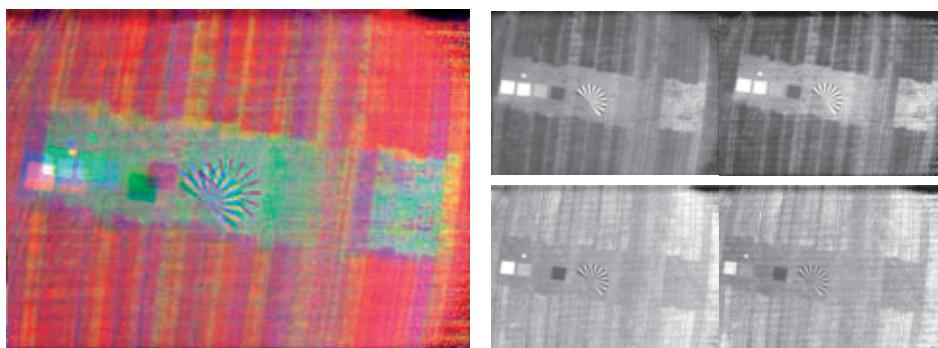


Fig. 5: Left: an example of an UASI image with the channels NIR-2, G and R, top-right: UASI-channels G and R, bottom right: UASI-channels red edge and NIR-2.

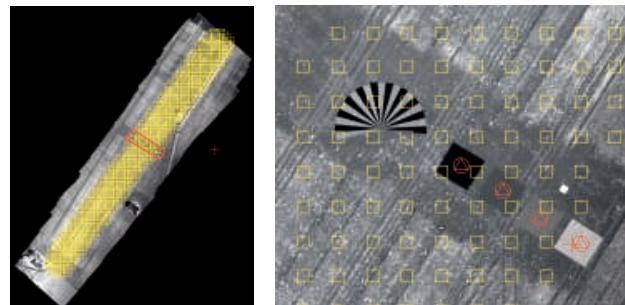


Fig. 6: Radiometric tie points (yellow) and control points (red) in a GF1 image strip.

in section 2.2. In this investigation, the method was used to eliminate the radiometric differences of overlapping images, which could be due to sensor inaccuracy or illumination differences, and for reflectance image generation. A grid of radiometric tie points was created with a 5 m point interval (Fig. 6), and the image coordinates of the tie points were calculated using the orientations and the DSM. *DN* observations were taken from all images having a view angle to the object point of less than 10°; it was assumed that with small view angles, the BRDF effects were limited so that the BRDF model could be ignored. The average of *DNs* in a small image window was used as the *DN* observation (UASI: 5 × 5 pixels, GF1: 30 × 30 pixels). Different parameterizations were tested. Depending on the illumination situation, different reflectance quantities may be obtained (SCHAEPMAN-STRUET et al. 2006). In this study, with direct sunshine, the approach provides BRFs.

3.5 Performance Assessment

The quality of the adjusted model parameters was evaluated by using the standard deviation estimates provided by the least squares method.

The variation coefficients (standard deviation divided by the average value) in each tie point were used to evaluate the homogeneity of the data before ($VCF_{original\ image}$) and after the correction ($VCF_{corrected\ image}$). The homogenization factor (HF) is (LÓPEZ et al. 2011) as follows:

$$HF (\%) = \frac{(VCF_{original\ image} - VCF_{corrected\ image})}{VCF_{original\ image}} \times 100 \quad (10)$$

The overall HF was calculated as an average of the HFs for all radiometric tie points.

The differences in the radiometric control points were used to evaluate the accuracy of the reflectance images. The root-mean-square error (RMSE) was calculated for all of the control points and images with the targets.

4 Results

4.1 Radiometric Block Adjustments

We carried out radiometric block adjustments with different combinations of relative and absolute parameters (8). The tested models were 1) relative offset ($b_{rel_1} \dots b_{rel_n}$), 2) relative linear model ($a_{rel_1} \dots a_{rel_n}, b_{rel_1} \dots b_{rel_n}$) and 3) absolute linear model and relative offset ($a_{abs}, b_{abs}, b_{rel_1} \dots b_{rel_n}$).

Fig. 7a shows the impact of correction on the average variation coefficient of the radiometric tie points. The homogenization factors (10) were with both sensors approximately 20–50 % with both relative correction scenarios, which means that grey value differences decreased with relative radiometric correction; the homogeneity was similar with single- and two-parameter relative correction models (models 1 and 2). The homogenization factors deteriorated in the cases with absolute radiometric correction (model 3). An example of a successful elimination of the radiometric differences of images in an image mosaic is shown in Fig. 7b.

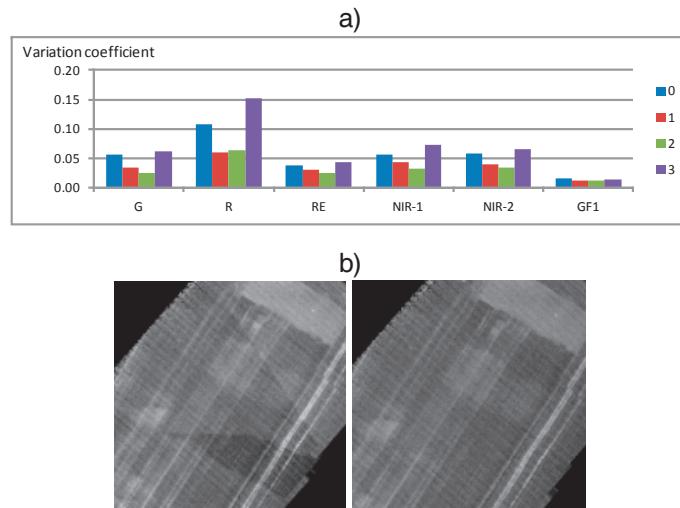


Fig. 7: a) Average variation coefficients of radiometric tie points for different channels with different models. 0: original images; 1: relative offset ($b_{rel_1} \dots b_{rel_n}$); 2: relative linear model ($a_{rel_1} \dots a_{rel_n}$, $b_{rel_1} \dots b_{rel_n}$); 3: absolute linear model and relative offset (a_{abs} , b_{abs} , $b_{rel_1} \dots b_{rel_n}$). b) An example of the successful relative radiometric correction in red channel.

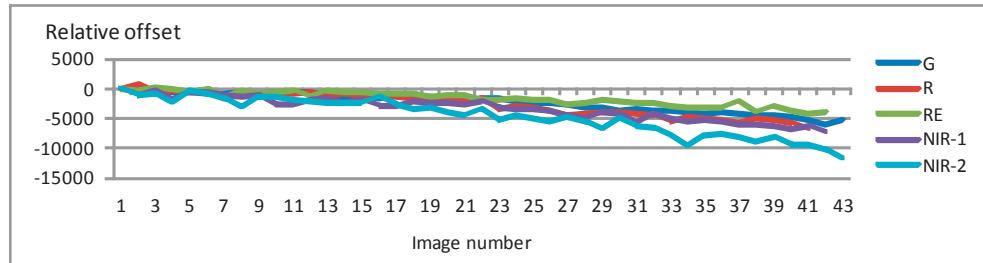


Fig. 8: The relative offset parameter ($b_{rel_1} \dots b_{rel_n}$) of different images.

The relative offset parameter of different images is shown in Fig. 8. The parameters are related to the topmost image in the image strip ($b_{rel_1} = 0$). A drift appeared in the offset parameters. The absolute parameters correlated strongly with the reflectance unknowns, which indicated that the solution was not quite controlled. Some constraints would be needed to eliminate the drift and correlations.

4.2 Accuracy of Reflectance Images

Examples of image mosaics produced from lens-fall-off corrected images and reflectance images are shown in Fig. 9. The brightening of the mosaics towards the West-North direction is due to the BRDF effects; the sunshine

was from the South-East direction, which is about perpendicular to the flight direction. The darkening of the UASI mosaic towards the North-East direction is most likely due to problems with the correction parameters and the soil properties.

We evaluated the accuracy of the reflectance images using the reflectance tarps. Two cases were evaluated: 1) for the block adjustment, we used absolute and relative parameters (a_{abs} , b_{abs} , $b_{rel_1} \dots b_{rel_i}$), and 2) we calculated the empirical line parameters using one image and used the parameters to correct the other images (3 images with UASI, 4 images with GF1). Reflectance differences (RMSE-value) in the reflectance reference targets are shown in Fig. 10. The RMSEs were mostly 0.006–0.008 for the reflectance units

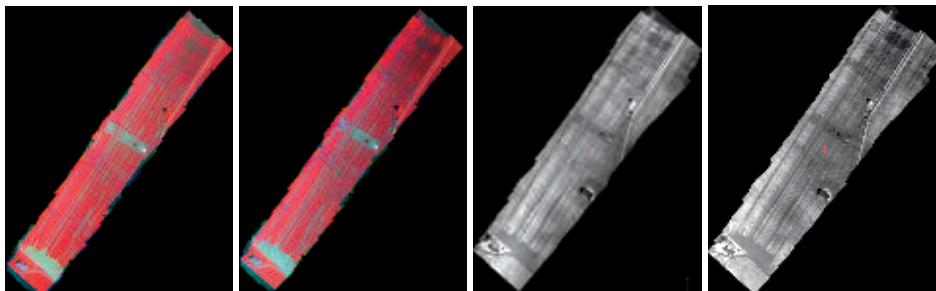


Fig. 9: From left to right: Original and reflectance UASI mosaic, original and reflectance GF1 mosaic. (North is up, East is to the right).

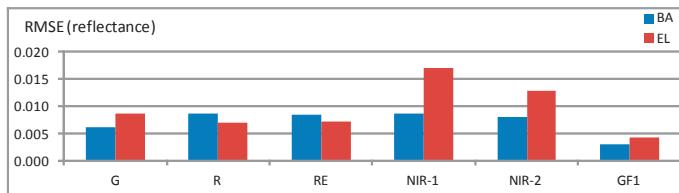


Fig. 10: Reflectance error (RMSE) in reflectance images in different channels (BA: radiometric block adjustment, EL: empirical line method).

and 5–7% of the reflectance value. With the empirical line method, larger differences appeared in NIR-1 and NIR-2 channels (large errors in the black target with a nominal reflectance of 0.05). In these channels, the block adjustment provided better accuracy. Reflectance errors were slightly lower in the GF1 images than in the UASI images, which could be the result of several factors: the lower georeferencing accuracy of UASI could cause larger standard deviations; the atmospheric conditions might have been different (a sun-photometer was not used during the campaign); or, higher noise in UASI images (Figs. 4 and 5). According to laboratory testing, the UASI is very stable. This evaluation gives accuracy in the areas close to the reflectance targets. Furthermore, the accuracy assessment is not independent in the case of block adjustment, because the same points were used in the adjustment and in the evaluation; thus, the result mainly validates the processing.

We made the following conclusions. The relative radiometric correction was necessary with the datasets and the offset parameter (b_{rel}) was sufficient for the relative correction. For the reflectance image generation the absolute linear model is required (a_{abs}, b_{abs}). The meth-

od has to be further improved in order to control the drifts and correlations.

5 Discussion

We developed a radiometric correction method for UAV image blocks which utilizes multiple overlaps in an image block and demonstrated the use of the method. Images were collected using two different imaging systems: a next-generation hyperspectral imaging system based on Fabry-Perot interferometer and developed by the VTT Technical Research Centre of Finland (MÄKYNEN et al. 2011, SAARI et al. 2011), and a commercial customer camera, both weighing less than 500 g.

The results showed that the method improved the homogeneity of an image block. The method is more economic than a method requiring a reflectance reference target in every image. The solution is computationally efficient because only a limited number of tie points have to be used.

There are several possibilities to improve the performance of the method. An elimination method for the outliers needs to be implemented; some approaches have been presented

in previous literature on the topic (CHANDILIER & MARTINOTY 2008, LÓPEZ et al. 2011). In this study, the object was quite homogeneous, so the outliers were not a serious problem. It is necessary to implement a BRDF model to improve the processing; for example, in order to adjust several image strips together and to provide radiometrically homogeneous image mosaics. Simple linear models were used for the absolute and relative correction; it is possible to use more rigorous models for atmospheric parameters ((1) and (4)). Number of reflectance unknowns could be decreased in order to eliminate the correlations. It is feasible to collect additional observations of the imaging conditions during UAV campaigns (for example, by using a sunphotometer or by using an irradiance sensor to collect observations of downwelling radiance, which is a component of the UASI) and to use them to constrain the method. Furthermore, in the case of hyperspectral sensors, it is possible to estimate some atmospheric parameters using appropriate channels. Using radiometric control points with a better distribution would probably decrease the systematic drift of the correction. It can be concluded that the approach presented here offers a powerful and flexible framework for rigorous and reliable radiometric correction.

We processed only five channels of the 50 channel hyperspectral data cube in order to prove the concept. The conventional photogrammetric workstation SOCET SET was not functional in the orientation determination of the small-format UASI images with large rotational differences and poor approximate orientation values. More efficient georeferencing approach has to be developed. The processing time for the radiometric correction is directly proportional to the number of channels processed.

The radiometric correction of low-altitude UAV images has many advantages in comparison to airborne imaging from a higher altitude using large-format cameras. It is feasible to install reflectance reference targets and irradiance sensors in the campaign area because the operator has to go to the area anyway. Atmospheric disturbances are much lower due to the shorter distances. On the other hand, many well-established radiometric correction methods are not possible in many UAV cam-

paigns, for example when using dark vegetation to provide a dark pixel values for correction methods based on dark pixel subtraction or when using spectral libraries as a reference. One characteristic of UAV campaigns is that they will need to be carried out under variable conditions, which has to be taken into account when developing the correction method.

The prerequisites for the method are accurate image orientations and DSM. The recent results have shown that the novel image matching methods provide sufficiently accurate DSMs for the object surfaces (LEBERL et al. 2010, HIRSCHMÜLLER 2011, ROSNELL et al. 2011), and this is the starting point for developing novel radiometric processing methods. Furthermore, radiometric laboratory calibration is required in order to utilize the image radiometry quantitatively.

6 Conclusions

Efficient methods are needed for the radiometric correction of UAV image blocks. In this study, we demonstrated the radiometric block adjustment of UAV image block. The approach is flexible and the novel sensing technology provides many possibilities for improving the method. Our investigation also shows that hyperspectral stereophotogrammetry is now possible with lightweight UAV imaging systems.

Acknowledgements

The research carried out in this study was funded by the Academy of Finland (Project No. 134181).

References

- APTINA LTD.: http://www.aptina.com/products/image_sensors/mt9p031i12stc/ (13.1.2012).
- BEISL, U., TELAAR, J. & V. SCHÖNERMARK, M., 2008: Atmospheric correction, reflectance calibration and BRDF correction for ADS40 image data. – The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences **37** (B7).
- BERNI, J.A., ZARCO-TEJADA, P.J., SUÁREZ, L. & FERRERES, E., 2009: Thermal and Narrowband Multi-

- spectral Remote Sensing for Vegetation Monitoring from an Unmanned Aerial Vehicle. – *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing* **47**: 722–738.
- CHANDELIER, L. & MARTINOTY, G., 2009: Radiometric aerial triangulation for the equalization of digital aerial images and orthoimages. – *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* **75** (2): 193–200.
- COLLINGS, S., CACETTA, P., CAMPBELL, N. & WU, X., 2011: Empirical models for radiometric calibration of digital aerial frame mosaics. – *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **49** (7): 2573–2588.
- DEVENECIA, K., WALKER, S. & ZHANG, B., 2007: New approaches to generating and processing high resolution elevation data with imagery. – FRITSCH, D. (ed.): *Photogrammetric Week 2007*: 297–308.
- EBNER, H. & HEIPKE, C., 1988: Integration of digital image matching and object surface reconstruction. – *International Archives for Photogrammetry and Remote Sensing* **27** (B11(III)): 534–545.
- GRENZDÖRFFER, G.J. & NIEMEYER, F., 2011: UAV based BRDF-measurements of agricultural surfaces with PFIFFIKUS. – *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **38** (1/C22).
- HAKALA, T., SUOMALAINEN, J. & PELTONIEMI, J.I., 2010: Acquisition of Bidirectional Reflectance Factor Dataset Using a Micro Unmanned Aerial Vehicle and a Consumer Camera. – *Remote Sensing* **2** (3): 819–832.
- HIRSCHMÜLLER, H., 2011: Semi-Global matching: motivation, development and applications. – FRITSCH, D. (ed.): *Photogrammetric Week 2011*: 173–184.
- HONKAVAARA, E., ARBIOL, R., MARKELIN, L., MARTINEZ, L., CRAMER, M., BOVET, S., CHANDELIER, L., ILVES, R., KILONUS, S., MARSHALL, P., SCHLÄPFER, D., TABOR, M., THOM, C. & VEJE, N., 2009: Digital airborne photogrammetry – A new tool for quantitative remote sensing? – A state-of-the-art review on radiometric aspects of digital photogrammetric images. – *Remote Sensing* **1** (3): 577–605.
- HUNT, E.R. JR., HIVELY, W.D., FUJIKAWA, S.J., LIN-DEN, D.S., DAUGHTRY, C.S.T. & McCARTY, G.W., 2010: Acquisition of NIR-Green-Blue Digital Photographs from Unmanned Aircraft for Crop Monitoring. – *Remote Sensing* **2**: 290–305.
- LEBERL, F., IRSCHARA, A., POCK, T., MEIXNER, P., GRUBER, M., SCHOLZ, S. & WIECHERT, A., 2010: Point clouds: Lidar versus 3D vision. – *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* **76** (10): 1123–1134.
- LÓPEZ, D.H., GARCÍA, B.F., PIQUERAS, J.G. & AOCÁ-ZAR, G.V., 2011: An approach to the radiometric aerotriangulation of photogrammetric images. – *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **66** (2011): 883–893.
- LUMIX, 2012: Panasonic Lumix GF1. – <http://panasonic.net/avc/lumix/systemcamera/gms/gf1/specifications.html> (13.1.2012).
- MÄKYNNEN, J., HOLMLUND, C., SAARI, H., OJALA, K. & ANTILA, T., 2011: Unmanned aerial vehicle (UAV) operated megapixel spectral camera. – Proc. SPIE 8186 (B).
- RICHTER, R. & SCHLÄPFER, D., 2002: Geo-atmospheric processing of airborne imaging spectrometry data. Part 2: atmospheric / topographic correction. – *International Journal of Remote Sensing* **23** (13): 2361–2649.
- ROSNELL, T., HONKAVAARA, E. & NURMINEN, K., 2011: On geometric processing of multi-temporal image data collected by light UAV systems. – *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **38** (1/C22, A).
- SAARI, H., PELLIKKA, I., PESONEN, L., TUOMINEN, S., HEIKKILÄ, J., HOLMLUND, C., MÄKYNNEN, J., OJALA, K. & ANTILA, T., 2011: Unmanned Aerial Vehicle (UAV) operated spectral camera system for forest and agriculture applications. – Proc. SPIE 8174.
- SCHAEPMAN-STRUB, G., SCHAEPMAN, M.E., PAINTER, T.H., DANGEL, S. & MARTONCHIK, J.V., 2006: Reflectance quantities in optical remote sensing – definitions and case studies. – *Remote Sensing of Environment* **103**: 27–42.
- SCHOTT, J.R., 2007: Remote sensing: The image chain approach. – 2nd ed., 666 p., Oxford University Press.
- SCHOWENGERDT, R.A., 2007: *Remote Sensing, Models and Methods for Image Processing*. – 3rd ed., Academic Press Inc., San Diego, CA, USA.
- SUOMALAINEN, J., HAKALA, T., PELTONIEMI, J. & PUTTONEN, E., 2009: Polarised multiangular reflectance measurements using the Finnish geodetic institute field goniospectrometer. – *Sensors* **9** (5): 3891–3907.
- WALKER, S., 2007: New features in SOCET SET®. – FRITSCH, D. (ed.): *Photogrammetric Week 2007*: 35–40.
- VON SCHÖNERMARK, M., GEIGER, B. & RÖSER, H.P., 2004: *Reflection properties of vegetation and soil: with a BRDF data base*. – 1st ed., 352 p., Wissenschaft und Technik Verlag, Berlin, Germany.
- ZHOU, G., 2009: Near Real-Time Orthorectification and mosaic of small UAV video flow for time-critical event response. – *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing* **47**: 739–747.

Addresses of the Authors:

Dr. EIIA HONKAVAARA, TEEMU HAKALA, LAURI MARKELIN & TOMI ROSNELL, Finnish Geodetic Institute, Geodeettirinne 2, 02430 Masala, Finland, Tel.: +358-40-192-0835 (Honkavaara), +358-9-295550 (others), Fax: +358-9-29555200, e-mail: first name.last name@fgi.fi

Dr. HEIKKI SAARI & JUSSI MÄKYNNEN, VTT Technical Research Centre of Finland, P.O. Box 1000, 02044 VTT, Finland, Tel.: +358-40-5891254, +358-20-722 111, Fax: +358-20-7227012, e-mail: heikki.saari@vtt.fi, jussi.makynen@vtt.fi

Manuskript eingereicht: November 2011
Angenommen: Januar 2012



Bundle Block Adjustment of CBERS-2B HRC Imagery Combining Control Points and Lines

ANTONIO M. G. TOMMASELLI & JOSÉ MARCATO JUNIOR, Presidente Prudente, Brasil

Keywords: Orbital images, control straight lines, indirect image orientation, CBERS images, multi-feature control

Summary: The aim of this work is to present the results of the assessment of rigorous bundle block adjustment models for orbital imagery of the High-Resolution Camera (HRC) of the CBERS (China-Brazil Earth Resources Satellite). The work is focused on the experimental assessment of the combined use of ground control points (GCP) and ground control lines (GCL) in a block adjustment. The mathematical models relating object and image spaces are based on collinearity (for points) and coplanarity (for lines) conditions with polynomial modelling of the spacecraft trajectory and attitude. These models were implemented in the software TMS (triangulation with multiple sensors) with multi-feature control (GCPs and GCLs) developed in-house. Experiments on a block of four CBERS-2B HRC images were accomplished using both GCPs and GCLs. The results show that the combination of the collinearity and coplanarity models can provide better results in the bundle block adjustment process than conventional bundle adjustment with GCPs only. A systematic error in the inner geometry of HRC camera caused by the displacement of one of the three CCD sensors and the lack of proper correction when fusing the three images to generate level 1 images was also verified. Experiments to evaluate the effects of this systematic error are also presented.

Zusammenfassung: *Bündelblockausgleichung von CBERS-2B HRC Bilddaten mit Passpunkten und Passlinien.* Ziel dieser Arbeit ist die Präsentation der Ergebnisse einer strengen Bündelblockausgleichung für Bilder, die mit der hochauflösenden Kamera (HRC) des Satelliten CBERS (China-Brazil Earth Resources Satellite) aufgenommen wurden. Der Schwerpunkt liegt auf der experimentellen Validierung des kombinierten Einsatzes von Passpunkten (PP) und -linien (PL) in der Blockausgleichung. Die mathematischen Modelle zur Verknüpfung von Objekt- und Bildraum basieren auf Kollinearitäts- (für Punkte) bzw. Komplanaritätsbedingungen (für Linien), wobei Flugbahn und Drehwinkel des Satelliten mit Polynomen modelliert werden. Diese Modelle wurden in der Software TMS (Triangulation mit multiplen Sensoren) mit Anpassung an unterschiedliche Pass-Merkmale (PP und PL) implementiert. Experimente für einen Block aus vier CBERS-2B HRC Bildern wurden unter Verwendung sowohl von PP als auch von PL durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Kombination von Kollinearitäts- und Komplanaritätsmodell in der Bündelblockausgleichung bessere Ergebnisse liefern kann als das übliche Modell unter ausschließlicher Verwendung von PP. Es wurde auch ein systematischer Fehler in der inneren Geometrie der HRC-Kamera verifiziert, der durch eine Verschiebung eines der drei CCD-Sensoren und das Fehlen einer angemessenen Korrektur bei der Fusion der drei Bilder zu einem Level 1 Bild verursacht wird. Experimente zur Untersuchung der Auswirkungen dieses systematischen Fehlers werden ebenfalls präsentiert.

1 Introduction

Earth observation and analysis from space imagery became feasible in the 1970s with

Landsat program for remote sensing purposes. In 1988, Brazil and China started the CBERS (China-Brazil Earth Resources Satellite) program aiming to foster the technologi-

cal development in the field of Remote Sensing. One advantage of this program is that images acquired of South American and African territories are freely distributed. Besides the sensors CCD and WFI (Wide Field Imager), CBERS-2B carried a High-Resolution Camera (HRC), providing images with a GSD (ground sample distance) of 2.7 meters. Although the CBERS-2B satellite ceased operations on April 16, 2010, the images in archives are still of crucial importance to users in Brazil for several applications including medium-scale mapping and to compensate for the lack of other imagery.

To improve their georeferencing accuracy, orbital imaging systems are equipped with direct orientation sensors. CBERS-2B had a single-frequency GPS receiver and a star track sensor. One problem that reduced positional accuracy of CBERS-2B imagery was the lack of star sensor data, probably due to electronic failures in the area of the South Atlantic Anomaly. As a consequence, the images distributed by INPE (Brazilian National Institute for Space Research) have a positioning error larger than one kilometre in some images that were assessed. To use CBERS-2B HRC images for mapping purposes, it is necessary to indirectly estimate the orientation elements using ground control elements in the object space (points, lines and/or areas).

This camera was not originally designed to provide stereoscopic coverage, though cross-track images present an overlap with a base-to-height (B/H) ratio of approximately 0.13, considering adjacent passages. More details about CBERS-2B orbit and HRC features can be found in (INPE 2011). With this weak intersection geometry, insertion of tie points does not improve the results. It is also important to mention that CBERS-2B HRC images present small dynamic ranges (approximately 40 grey values), causing an error of approximately 1–3 pixels in the interactive measurement of the image points and lines (MARCATO JUNIOR et al. 2010).

CBERS-2B HRC has three CCDs in the focal plane that are not aligned. The central CCD is displaced by 26 mm along the flying direction, and this displacement can cause interior orientation errors, even when considering that a virtual image is generated by stitch-

ing the three partial scans. BALTSAVIAS et al. (2006) performed an investigation of the errors in DTMs generated by Ikonos Triplets and concluded that the changes in the relative displacement of the three CCDs caused height jumps in the DTM.

The orientation of pushbroom images can be performed using several techniques, mainly based on physical or empirical models (RADHADEVI et al. 1994, FRITSCH & STALLMANN 2000, DOWMAN & MICHALIS 2003, TOUTIN 2004, FRASER & HANLEY 2005, TOUTIN 2006, KIM & DOWMAN 2006, POLI 2007, WESER et al. 2008, ROTTENSTEINER et al. 2009, TONG et al. 2010, LIU et al. 2011). Physical models are generally based on bundle adjustment with adapted collinearity equations using ground control points (GCPs). Empirical models are mostly based on rational function models (RFMs), the coefficients of which are normally supplied by the image vendor.

The physical models can use either position and rotation angles as model parameters or ephemeris (position and velocity) and attitude angles (KIM & DOWMAN 2006). Independently from the used model, ground control entities are required to compute the orientation parameters or to correct the coefficients of the RFM to achieve accuracy compatible to the image spatial resolution.

For the indirect orientation of pushbroom images, the number of GCPs must be sufficient to provide redundancy to estimate the parameters by the least-squares method. Considering 12 exterior orientation parameters (EOP) (see section 2), at least 6 GCPs (with no redundancy) per image are required; however, the operational practice is to achieve at least 20 GCPs for each scene. This large number of GCPs may impact the overall costs of the projects, depending on the required accuracy and area extension. When accurate orbital information (platform position, velocity and attitude) is available, this information can be used either to provide observations/constraints in the bundle adjustment or to generate the coefficients of the RFM, reducing the number of required GCPs.

Another alternative is to use linear features as control entities. Previous works (MULAWA & MIKHAIL 1988, HABIB et al. 2002, TOMMASELLI & MEDEIROS 2010) showed the advantages of

using ground control lines (GCLs) as alternatives to GCPs, but the simultaneous adjustment with these types of ground data has not yet been assessed for CBERS-2B HRC.

Ground surveying of lineal entities is much easier and faster than surveying of GCPs for the indirect orientation of images with the spatial resolution of HRC. For example, road centre lines can be surveyed very quickly and with suitable accuracy with kinematic GPS positioning, while travelling between control point areas. Thus, the combination of both sources of ground control entities can be considered as a relevant practice to maximise the number of control entities while maintaining almost the same costs.

The aim of this work is to present the results of the assessment of rigorous bundle block adjustment models for CBERS-2B HRC imagery using points and lines as control elements. Additionally, the effects of the CCD displacements in the results of the bundle adjustment will be assessed.

2 Background – Mathematical Model

Indirect orientation of satellite images with bundle block adjustment was first carried out with SPOT across-track stereo images (TOUTIN & ROCHON 1986). Similar techniques have been used for images acquired by different satellites such as Landsat, Komsat, Quick-Bird and ALOS (TOUTIN 2003, KIM & DOWMAN 2006, POLI 2007).

Pushbroom sensors generate a one-dimensional image at each instant. Orbital platforms are more stable than an airborne scanner, and thus, the EOP can be modelled with polynomials using either position and rotation angles or orbit and attitude angles as parameters (KIM & DOWMAN 2006).

In the case of pushbroom sensors, there are six unknowns for each image row. These six unknowns can be directly determined during the image acquisition using GNSS, inertial sensors, solar sensors and stellar cameras, or they can be estimated indirectly, using some source of ground control.

Several different mathematical models have been proposed for the orientation and geomet-

ric correction of pushbroom imagery. The physical models used in this work are based on the geometric properties of the acquisition process and generally use collinearity equations with some extensions.

Line-coplanarity models were also developed for the orientation of frame and pushbroom imagery (MULAWA & MIKHAIL 1988, HABIB et al. 2002, SHIN et al. 2007). These models are based on the coplanarity between the projection ray (vector from the perspective centre to the image point), the instantaneous perspective centre and the corresponding straight object line (Fig. 1).

One problem with CBERS-2B HRC images is the accuracy of their direct georeferencing, mainly caused by attitude angles errors (YU et al. 2008). YU et al. (2008) presented a calibration model to eliminate constant angular errors with sparse control. Even applying this method, errors of approximately 20 GSDs in the check points were observed.

Thus, it is necessary to correct these images with accurate position and orientation data, which can be estimated with dense control entities, such as control points or straight control lines. Although points are generally used as control elements in bundle adjustment, some advantages also motivate the use of linear features (TOMMASELLI & TOZZI 1996, HABIB & MORGAN 2003) for the following reasons:

- Image lines are easily found in man-made environments.
- The correspondence between points from image and object lines is not necessary.
- Image lines can be extracted with sub-pixel precision.

HABIB et al. (2001) also showed that the use of straight lines as constraints in the bundle adjustment of images acquired by linear array scanners provides a better estimation of the EOP when compared to those methods that use only distinct points. As a consequence of the linear scanner array geometry, lines that are straight in the object space do not appear as straight lines in the scanned images. Thus, the application of the straight-line constraints for this type of sensor is particularly important, since it increases the geometric strength of the adjustment.

In this paper, the mathematical models relating object and image spaces are based on

collinearity (for points) and coplanarity (for lines) conditions with polynomial modelling of the sensor trajectory and attitude. These models will be presented in the next sections.

2.1 Collinearity Model with Points (CMP)

The collinearity model with points (CMP) for pushbroom sensors was developed based on the collinearity condition between a point in the object space, its homologue in the image space and the instantaneous perspective centre (PC) corresponding to the image row that contains this point. (1) expresses the collinearity model for the pushbroom geometry (GUGAN & DOWMAN 1988).

$$\begin{aligned} 0 &= -f \frac{r_{11}(X_i - X_s) + r_{21}(Y_i - Y_s) + r_{31}(Z_i - Z_s)}{r_{13}(X_i - X_s) + r_{23}(Y_i - Y_s) + r_{33}(Z_i - Z_s)} \\ y_i &= -f \frac{r_{12}(X_i - X_s) + r_{22}(Y_i - Y_s) + r_{32}(Z_i - Z_s)}{r_{13}(X_i - X_s) + r_{23}(Y_i - Y_s) + r_{33}(Z_i - Z_s)} \quad (1) \end{aligned}$$

where y_i is the image coordinate in the instantaneous photogrammetric reference system of a point i in an image row j acquired in an instant t . The x coordinate is zero because the x axis of the instantaneous photogrammetric reference system is oriented in the flying direction. X_p, Y_p, Z_i are the 3D coordinates of the corresponding point in the object space; X_s, Y_s, Z_s are the instantaneous coordinates of the camera PC, corresponding to the image row j , and these values are modelled by a time dependent polynomial (3); r_{kl} are the elements of the instantaneous rotation matrix R_j from image space reference system to object space reference system corresponding to an image row j . The rotation matrix R_j is given in (2), in which s and c denotes the \sin and \cos , respectively.

In (3), the instantaneous EOP for each image row are modelled by second-order polynomials (ORUN & NATARAJAN 1994):

$$\begin{aligned} X_s &= X_0 + a_1 t + b_1 t^2 \\ Y_s &= Y_0 + a_2 t + b_2 t^2 \\ Z_s &= Z_0 + a_3 t + b_3 t^2 \\ \kappa &= \kappa_0 + a_4 t + b_4 t^2 \\ \varphi &= \varphi_0 \\ \omega &= \omega_0 \end{aligned} \quad (3)$$

where X_0, Y_0, Z_0 are the PC coordinates and $\kappa_0, \varphi_0, \omega_0$ are the rotation angles for the first image row; a_i and b_i ($i \in [1, \dots, 4]$) are polynomial coefficients; t is a time-dependent parameter, which can be the image row number, with sub-pixel precision. The parameters a_i and b_i will absorb the scale difference between time and a float number representing the image row.

To avoid the simultaneous estimation of highly correlated pairs of parameters (e.g., φ and X_0 , ω and Y_0), the φ_0 and ω_0 angles were not considered as unknowns. Instead, constant values obtained from the satellite orbit geometry were used for these angles, and errors in these values will be absorbed by X_0 and Y_0 . As an alternative to this solution, the selection of estimable parameters and least squares solution could also be based on singular value decomposition and QR decomposition (CRESPI et al. 2008, p. 1324).

2.2 Mathematical Model using straight Lines

The line coplanarity model (LCM) is based on the coplanarity between the projection ray containing an image point (v_j) and the projection plane in the object space defined by an object line and the instantaneous PC.

$$R_j = \begin{bmatrix} c\kappa_j & c\varphi_j & c\kappa_j s\varphi_j s\omega_j + s\kappa_j c\omega_j & -c\kappa_j s\varphi_j c\omega_j + s\kappa_j s\omega_j \\ -s\kappa_j & c\varphi_j & -s\kappa_j s\varphi_j s\omega_j + c\kappa_j c\omega_j & s\kappa_j s\varphi_j c\omega_j + c\kappa_j s\omega_j \\ s\varphi_j & & -c\varphi_j s\omega_j & c\varphi_j c\omega_j \end{bmatrix} \quad (2)$$

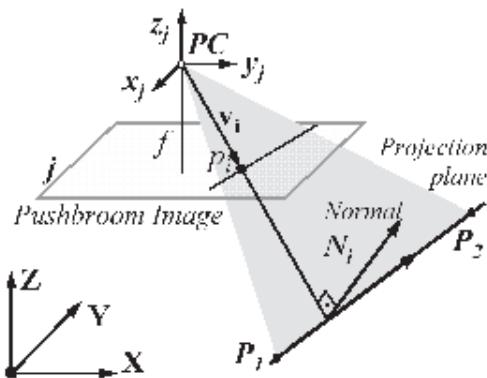


Fig. 1: The projection ray and the vector normal to the projection plane in the object space.

Based on this geometry, it follows that the vector normal to the projection plane in the object space must be orthogonal to the projection ray (Fig. 1).

The straight line in the object space is defined by P_1 and P_2 , and p_i is a point in the corresponding image line for a specific image row j (Fig. 1). There is no need for correspondence between points in the image with another one in the object space. This model was originally presented by MULAWA & MIKHAIL (1988) and HABIB et al. (2002).

The direction of projection ray (v_i) in object space is obtained by applying the rotation matrix \mathbf{R}_j to the image point p_i . The orthogonality condition between v_i and the vector normal to the projection plane in object space (N_i) can be expressed by (4).

$$\mathbf{N}_i \cdot \mathbf{R}_j \begin{bmatrix} 0 \\ y_i \\ -f \end{bmatrix} = 0 \quad (4)$$

In (4), \mathbf{N}_i is defined by the cross product of the direction vector $(P_2 - P_1)$ of the straight line and the vector difference between the instantaneous PC and point P_1 in the object straight line $(PC - P_1)$ (see Fig. 1); and $[0, y_i, -f]^T$ is the position vector of point p_i in the image space (projection ray).

A detailed description of this model is presented in TOMMASELLI & MEDEIROS (2010).

3 Experiments and Results

The models were implemented in the in-house developed software TMS (triangulation with multiple sensors), with multi-feature control (GCPs and GCLs). The parameters estimation method implemented in this software is the unified approach to least squares adjustment (MIKHAIL & ACKERMANN 1976, p. 333). This method was used because several sources of data can be handled within the same software.

Experiments were conducted with a block composed of four level 1 (only with radiometric correction) CBERS-2B HRC images. These images were acquired in adjacent orbits (159 and 158). The images 159-E_125-1 (image 3) and 159-E_125-2 (image 1) were collected at the same day. However, images 158-A_125-1 (image 4) and 158-A_125-2 (image 2) were acquired on different dates. Fig. 2 shows the four images used in the experiments. Some technical specifications of HRC are presented in Tab. 1.

The control and check points were distinct points surveyed with a dual-frequency GPS, Hipper GGD. The GPS data were processed using the PPP (Precise Point Positioning) on-

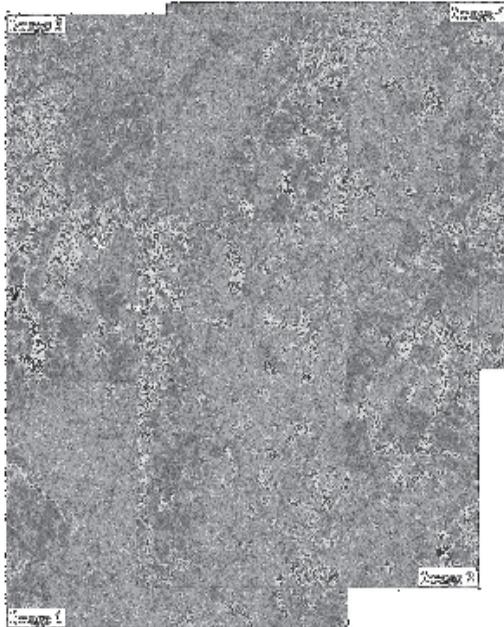


Fig. 2: Block composed by CBERS-2B HRC images used in the experiments.

Tab. 1: Technical features of CBERS-2B HRC (INPE, 2011).

Focal length (mm)	3398
Image level	1 (radiometric correction)
Image size (pixels)	12 246 × 12 246
GSD (m)	2.7
Orbital altitude (km)	778

line service available at the IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – Brazilian Institute of Geography and Statistics) web site.

Object lines were defined by endpoints directly measured on road paths with GPS in kinematic mode. After processing the GPS data collected in kinematic mode, the resulting coordinates were filtered to remove points with a high standard deviation and to establish representative coordinates for each road straight line segment. In this last step, a 3D collinearity condition was applied among the road points to ensure that the points are on a straight line with a certain accuracy level. Fig. 3 depicts this condition. To verify whether or not point P_3 belongs to the straight line defined by points P_1 and P_2 , the orthogonal distance (L) of point (P_3) to the straight line and the vertical (θ) and horizontal (α) deflection angles were computed. Thus, by establishing proper thresholds ($T_L = \pm 2.5$ m; $T_\theta = \pm 0.2^\circ$; $T_\alpha = \pm 0.4^\circ$), it is possible to determine if the point actually belongs to the straight line.

After this analysis of road paths, the coordinates of the road centre were calculated by applying variable offsets, which were estimated through the average values of the distances

between the car paths along both directions on the road.

It is worth noting that a very dense cloud points can be surveyed on the ground, and from these points some suitable line segments are extracted automatically. The LCM, as presented in (4), requires only one image point belonging to that line segment. A second or a third point can be measured, providing more conditions equations, based on (4). From an operational point of view, it is quite straightforward to acquire GPS points while travelling from one control point to the next one. Additional paths can improve the number of control lines at a very reasonable cost-benefit ratio when comparing it to the measurement of a control point. Existing road base maps can also be used, provided that their quality is compatible to the images to be oriented.

Image coordinates of both GCPs and points belonging to an image line were measured interactively on-screen. It is important to note that well-defined lines and edges can be measured with subpixel precision using techniques of image processing, but in this case, the images have low contrast, making automation troublesome. For this reason, in all experiments presented in this paper, the on-screen measurement was conducted with at least two points per line.

Experiments using both models, collinearity (CMP) and coplanarity (LCM), for block adjustment were performed in addition to some experiments using different configurations of control entities. The main characteristics of these experiments are presented in Tab. 2. Finally, an experiment to assess the effects of relative misalignment of the CCD sensors in the CBERS-2B HRC focal plane was performed.

The first set of experiments was conducted with all available GCPs and GCLs (see Tab. 2) to serve as references. Fig. 4 shows the control points and lines configurations along the block used in the experiments.

For each experiment the position-rotation parameters (12 parameters, (3)) were estimated using both models ((1) and (4)) and datasets according to Tab. 2 and Fig. 4.

Ground coordinates of control points and endpoints of GCLs were introduced as relative constraints with standard deviations of 10 cm

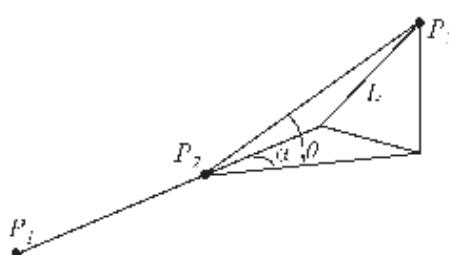


Fig. 3: Collinearity condition used to establish endpoints of control straight lines.

Tab. 2: Number of GCPs and GCLs used in the experiments.

Experiment	A CMP	B LCM	C	D	E	F	G
Num. of GCPs	55	0	55	22	22	12	12
Num. of GCLs	0	73	73	0	73	0	73

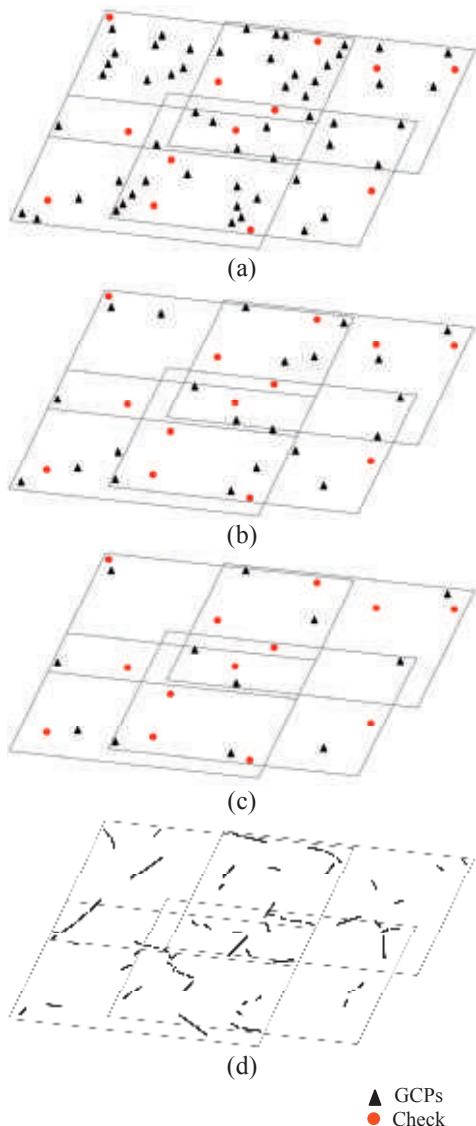


Fig. 4: Configurations of the control points, check points, and control lines used in the experiments: (a) 55 GCPs and 13 check points, (b) 22 GCPs and 13 check points, (c) 12 GCPs and 13 check points, (d) 73 GCLs.

in all components. This accuracy for the GCLs endpoints is optimistic considering the survey technique previously described. However, in the bundle adjustment the adjusted image coordinates and parameters will absorb the error in the GCLs coordinates. Geocentric Cartesian coordinates of all points (GCPs and endpoints of GCLs) were computed in the WGS84 reference frame. Thus, the parameters were also estimated in this reference frame.

The quality of the estimated parameters was assessed using 13 independent check points (Fig. 4a). The check points coordinates have the same accuracy as the GCPs because they were surveyed using the same technique.

First, both the coordinates of the check points and the estimated parameters were transformed to a local right-handed Cartesian System (Y axis in the direction of local north and Z axis aligned with the normal in the local origin). Then, the coordinates of these check points were computed by back-projecting image coordinates using the inverse form of the collinearity equations considering a known Z value in the local reference system. The discrepancies between the X and Y ground coordinates and those obtained with the inverse collinearity model were then computed.

Tab. 3 presents the RMSE (root-mean-square error) in the check point coordinates for each image of the reference experiments, in which all available GCPs and GCLs were used. In the last row of Tab. 3, we present the total RMSE, computed for all check points in the images. The results presented in Tab. 3 represent the final accuracy that would be achieved with such a procedure when using HRC images.

Tab. 3: RMSE (in GSD) in the check point coordinates (single-ray backprojection with a known elevation).

Image	A 55 GCPs		B 73 GCLs		C 55 GCPs 73 GCLs	
	X	Y	X	Y	X	Y
1	3.5	2.0	3.3	2.0	3.0	1.7
2	4.7	2.4	5.3	2.5	3.4	2.0
3	5.8	2.6	2.7	1.8	3.6	2.6
4	3.1	3.0	7.3	3.4	4.5	2.4
Total	4.1	2.4	4.7	2.3	3.4	2.1

The analysis of Tab. 3 shows that in some cases the CMP (GCPs) provided better results when compared to the LCM (GCLs). This finding was verified in image 4, in which the RMSE obtained with the CMP was 3.1 and 3.0 GSDs, while the RMSE for LCM was 7.3 and 3.4 in X and Y, respectively. In image 3, however, LCM provided better results compared to the CMP. These results are related to the geometric configurations of points and lines, as shown in Figs. 4 and 5, and for HRC images.

It was also verified that, in general, the combination of GCPs and GCLs reduced the RMSE in the check point coordinates.

Experiments reducing the number of GCPs were also accomplished (see Tab. 2 for the number of control entities and Fig. 4 to see the geometric configurations).

Tab. 4 presents the RMSE in the check point coordinates for the other experiments described in Tab. 2. Fig. 5 shows the resultant

Tab. 4: RMSE (in GSD) in the check points coordinates computed with parameters estimated in experiments D, E, F, and G.

	D		E		F		G	
	22 GCPs	22 GCPs 73 GCLs	12 GCPs	12 GCPs 73 GCLs				
Image	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
1	7.8	2.7	3.3	1.8	18.3	8.3	3.3	1.9
2	8.1	4.5	2.6	2.0	27.2	5.0	2.2	1.9
3	5.1	2.4	3.2	2.2	13.1	6.6	3.5	1.9
4	3.1	2.3	5.3	2.2	30.3	4.0	5.6	2.8
Total	5.9	2.9	3.5	1.9	21.7	5.8	3.6	2.0

Tab. 5: RMSE in the coordinates of the checkpoints computed with EOP estimated considering two sets of CCDs (central and lateral).

	Image 1		nep	Image 2		nep	Image 3		nep	Image 4		nep
	X	Y		X	Y		X	Y		X	Y	
Central CCD RMSE (GSD)	1.74	0.37	3	2.02	1.61	3	1.69	0.80	2	3.59	2.66	2
Lateral CCDS RMSE (GSD)	1.44	1.11	3	1.25	2.46	3	1.18	2.41	4	1.46	1.80	4
3 CCDS RMSE (GSD)	1.43	0.74		1.50	1.86		1.18	1.90		1.96	1.83	
Total (GSD)										1.4	1.5	

RMSE of the two coordinate components (X and Y) for all experiments.

As it was expected, Tab. 4 and Fig. 5 show that the RMSE in the check point coordinates increases as the number of GCPs decreases (experiments D and F). It was also verified that the combination of GCPs and GCLs improves the results. The results obtained by combin-

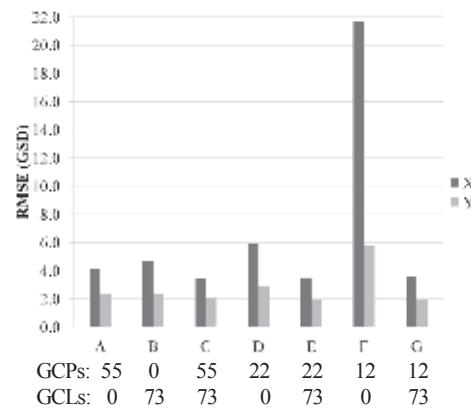


Fig. 5: RMSE in XY in check points for each experiment.

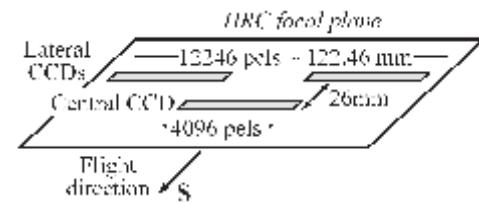


Fig. 6: HRC inner geometry, with the three CCDs in the focal plane.

ing 12 GCPs with 73 GCLs (experiment G) are approximately similar to those obtained with the total number of GCPs (experiment A – see Tab. 3 and Fig. 5).

The RMSE in the X coordinate for all experiments were larger than the RMSE in the Y coordinate. In general, the RMSE in X coordinate surpass 3 GSDs, indicating that a systematic error in the inner geometry of the HRC camera affected this coordinate.

As it was previously mentioned, the HRC sensor is composed of three matrices of CCD detectors. The two lateral matrices (1 and 3) are aligned, and the central matrix (2) is displaced by 26 mm along the flying direction (Fig. 6). The overlap between the images collected from each matrix is approximately 8.5 pixels. Techniques of area based matching and image transformation are applied to generate the virtual images with 12246 columns, which are made available to the users. An error in the inner geometry of the images is likely to occur, owing to the difference of approximately 0.89 seconds for the acquisition of the corresponding image rows of CCDs 1/3 and 2. As a consequence, the EOP are different for CCDs 1/3 and 2, and the image stitching procedure that is applied to match the three images cannot be sufficient to correct these differences.

To assess the quality of HRC imagery generation, experiments with two different data-sets were accomplished: (1) all points and lines observations belonging only to the central CCD (columns 4082 to 8164) and (2) all points and lines observed in the lateral CCDs (columns: 0 to 4082 and 8164 to 12246).

The step previously described provides two sets of EOP, one for the lateral CCDs and another one for the central CCD.

The coordinates of the check points were then estimated through the back-ray projection procedure using both sets of EOP. Tab. 5 presents the RMSE in the 13 check point coordinates (X and Y in GSD) for each image and for check points lying in the coverage areas of the central CCD and lateral CCDs. The number of check points (ncp) is also presented in Tab. 5. In the central CCD of images 3 and 4, only 2 check points were available, but this small number did not affect significantly the results assessment. In Tab. 5, the total RMSE for all check points covered by the 3 CCDs,

though with their coordinates computed using two sets of EOP, are presented (Tab. 5, third row). Finally, the total RMSE, for all check points and all images was computed and are presented in the last row of Tab. 5.

Comparing the total RMSE of Tab. 5 with the RMSE of experiment C presented in Tab. 3, it can be observed that the former is 41 % of the value in X and 71 % of the value in Y.

The RMSE in check point coordinates showed that a better result is achieved when the images of the CCD matrices are processed in two separate runs. This result gives a strong indication that there is a systematic error caused by the image fusion.

In general, the RMSE in the check point coordinates are less than two GSDs (5 m). This result indicates that the generation of the virtual image introduces a systematic error in the inner geometry of the images, caused by the non-alignment of the CCDs of the sensor.

Finally, as it was previously mentioned, the CBERS-2B HRC camera presents a reduced dynamic range that affected the identification and measurement of control entities in the images. Although the nominal GSD of CBERS-2B HRC is 2.7 m, the EIFOV (effective instantaneous field of view) in the along- and across-track directions are approximately 4.1 m and 4.6 m, respectively. Therefore, it can be concluded that the results with GCPs and GCLs are near one EIFOV.

4 Conclusions

This paper presented an approach aimed at the indirect orientation of pushbroom images, using experiments performed with CBERS-2B HRC images. The mathematical models of collinearity and coplanarity for straight lines were used in an adapted form of triangulation of pushbroom images. Experiments using both the collinearity (CMP) and the coplanarity models (LCM) for a block composed of four CBERS-2B HRC images from two adjacent orbits were performed. The models were implemented using TMS software that uses multi-feature control (points and lines).

The results showed that the line coplanarity model works well in block adjustment with CBERS-2B HRC images.

The results showed that the combination of collinearity and line coplanarity models provided better results in the bundle block adjustment process than conventional bundle adjustment with GCPs only. A systematic error in the inner geometry of the HRC camera caused by the displacement of one of the three CCD sensors and the lack of proper correction when fusing the three images to generate level 1 virtual image was also verified.

The experiments show that the use of ground control lines could reduce or even eliminate the need for ground control points. The combination of both control entities is a good compromise, as it was shown in this study. In countries with deficient cartographic coverage, such as Brazil, techniques for fast image orientation are of great importance.

Techniques to improve and automate the measurement of image points and lines will be developed and the effects of introducing orbital data in the bundle adjustment will be assessed in future work. It is important to mention that the CBERS-2B HRC was an experimental camera that was not developed for commercial purposes.

Acknowledgements

The authors would like to acknowledge the support of FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) through a Master Scholarship, and CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) through Research Grants.

References

- BALTSAVIAS, E., LI, Z. & EISENBEISS, H., 2006: DSM Generation and Interior Orientation Determination of IKONOS Images Using a Testfield in Switzerland. – *PFG 1/2006*: 41–54.
- CRESPI, M., FRATARCANGELI, F., GIANNONE, F., COLOSIMO, G., PIERALICE, F. & JACOBSEN, K., 2008: Geometric potential of Cartosat-1 stereo imagery. – *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* **37** (B1): 1323–1330.
- DOWMAN, I. & MICHALIS, P., 2003: Generic rigorous model for along track stereo satellite sensors. – *ISPRS Workshop on High Resolution Mapping from Space*, Hannover, Germany.
- FRASER, C.S. & HANLEY, H.B., 2005: Bias-compensated RPCs for Sensor Orientation of High-resolution Satellite Imagery. – *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* **71** (8): 909–915.
- FRTSCH, D. & STALLMANN, D., 2000: Rigorous photogrammetric processing of high resolution satellite imagery. – *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* **33** (B1): 313–321.
- GUGAN, D.J. & DOWMAN, I.J., 1988: Accuracy and completeness of topographic mapping from SPOT imagery. – *Photogrammetric Record* **12** (72): 787–796.
- HABIB, A., LEE, Y. & MORGAN, M., 2001: Bundle Adjustment with Self-Calibration of Line Cameras using Straight Lines. – *Joint Workshop of ISPRS WG I/2, I/5 and IV/7: High Resolution Mapping from Space*, University of Hannover.
- HABIB, A., MORGAN, M. & LEE, Y., 2002: Bundle Adjustment with Self-Calibration using Straight Lines. – *Photogrammetric Record* **17** (100): 635–650.
- HABIB, A. & MORGAN, M.F., 2003: Linear Features in Photogrammetry. – *Boletim de Ciências Geodésicas* **9** (1): 3–24.
- INPE, 2011: CBERS – China-Brazil Earth Resources Satellite. – <http://www.cbers.inpe.br>. (10.11.2011).
- KIM, T. & DOWMAN, I., 2006: Comparison of two physical sensor models for satellite images: Position-Rotation model and Orbit-Attitude model. – *The Photogrammetric Record* **21** (114): 110–123.
- LIU, S., FRASER, C.S., ZHANG, C. & RAVANBAKHS, M., 2011: Georeferencing performance of Theos Satellite Imagery. – *The Photogrammetric Record* **26** (134): 250–262.
- MARCATO JUNIOR, J., TOMMASELLI, A.M.G., MEDEIROS, N.G. & OLIVEIRA, R.A., 2010: Bundle Block Adjustment of CBERS 2B HRC Images using Control Lines. – *The International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Calgary **XXXVIII** (1), unpaginated CD.
- MIKHAIL, E.M. & ACKERMANN, F., 1976: Observations and Least Squares. – 1st ed., 497 p., IEP, New York.
- MULAWA, D.C. & MIKHAIL, E.M., 1988: Photogrammetric treatment of linear features. – *The International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* **III**: 383–393, Kyoto.
- ORUN, A.B. & NATARAJAN, K., 1994: A modified bundle adjustment software for SPOT imagery and photography: tradeoff. – *Photogrammetric*

- Engineering & Remote Sensing **60** (12): 1431–1437.
- POLI, D., 2007: A Rigorous Model for Spaceborne Linear Array Sensors. – Photogrammetric Engineering & Remote Sensing **73** (2): 187–196.
- RADHADEVI, P.V., SASIKUMAR, T.P. & RAMACHANDRAN, R., 1994: Orbit attitude modelling and derivation of ground co-ordinates from spot stereopairs. – ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing **49** (4): 22–28.
- ROTTENSTEINER, F., WESER, T., LEWIS, A. & FRASER, C.S., 2009: A Strip Adjustment Approach for Precise Georeferencing of ALOS Optical Imagery. – IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing **47** (12): 4083–4091.
- SHIN, S.W., HABIB, A.F., GHANMA, M., KIM, G. & KIM, E.M., 2007: Algorithms for Multi-sensor and Multi-primitive Photogrammetric Triangulation. – ETRI Journal **29** (4): 411–420.
- TOMMASELLI, A.M.G. & TOZZI, C.L., 1996: A recursive approach to space resection using straight lines. – Photogrammetric Engineering & Remote Sensing **62** (1): 57–66.
- TOMMASELLI, A.M.G. & MEDEIROS, N.G., 2010: Determination of the indirect orientation of orbital pushbroom images using control straight lines. – Photogrammetric Record **25** (130): 159–179.
- TONG, X., LIU, S. & WENG, Q., 2010: Bias-corrected rational polynomial coefficients for high accuracy geo-positioning of QuickBird stereo imagery. – ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing **65** (2): 218–226.
- TOUTIN, T. & ROCHON G., 1986: SPOT a new cartographic toll. – The International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Edinburgh, Scotland **26** (4): 192–205.
- TOUTIN, T., 2003: Block Bundle Adjustment of Landsat 7 ETM+ Images over Mountainous Areas. – Photogrammetric Engineering & Remote Sensing **69** (12): 1341–1349.
- TOUTIN, T., 2004: Geometric processing of remote sensing images: models, algorithms and methods. – International Journal of Remote Sensing **25** (10): 1893–1924.
- TOUTIN, T., 2006: Comparison of 3D Physical and Empirical Models for Generating DSMs from Stereo HR images. – Photogrammetric Engineering and Remote Sensing **72** (5): 597–604.
- WESER, T., ROTTENSTEINER, F., WILLNEFF, J., POON, J. & FRASER, C.S., 2008: Development and testing of a generic sensor model for pushbroom satellite imagery. – The Photogrammetric Record **23** (123): 255–274.
- YU, J., YUAN, X. & ZHENLI, W., 2008: Calibration of constant angular error for CBERS-2 imagery with few ground control points. – The International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing **37** (B1): 769–774, Beijing.

Address of the authors:

Prof. Dr. ANTONIO M. G. TOMMASELLI, tomaseli@fct.unesp.br, Eng. Ms. JOSÉ MARCATO JUNIOR, jrmarcato@gmail.com, Dept. of Cartography, UNESP – Universidade Estadual Paulista, Rua Roberto Simonsen 305, Presidente Prudente, São Paulo, Brasilien

Manuskript eingereicht: November 2011
Angenommen: Januar 2012



Konzeption und Genauigkeitsabschätzungen für eine Bestimmung der äußeren Orientierung eines Unmanned Aerial Vehicles (UAV)

FRANK NIEMEYER, RALF BILL & GÖRRES GRENZDÖRFFER, Rostock

Keywords: Orientierungsgenauigkeit, Unmanned Aerial Vehicle, terrestrische Zielverfolgung, Varianzfortpflanzung, Ausgleichungsrechnung

Summary: This paper focuses on the development of a concept for determining the exterior orientation of an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) using a terrestrial system with target tracking tacheometer, a reflector and additional coloured markers on board of the UAV. Two variants – a one-point solution and a stereo-solution – will be presented. All basic geometrical relations are derived. An accuracy assessment is carried out, based on the law of error propagation and the least squares method, integrating a Monte Carlo approach.

The results of the accuracy assessment show that the position accuracy (first part of exterior orientation) may be obtained in the sub-centimetre range. The accuracy of the rotations (roll, pitch, yaw) can be up to 0.2° . This concept seems to be very interesting for practical realisation especially in fields where

- 1) an UAV cannot be equipped with additional sensors and
- 2) geodetic and photogrammetric equipment are already used on-site (e.g. construction site monitoring).

Zusammenfassung: In diesem Beitrag wird ein Konzept für eine Bestimmung der Position und Orientierung eines UAV durch ein terrestrisches System bestehend aus einem zielverfolgenden Videotachymeter, einem Reflektor und zusätzlichen Markierungen (kugelförmige, verschiedenfarbige Zielmarken) am UAV entwickelt. Zwei Varianten – eine Einbild-Lösung und eine Stereolösung – werden unterschieden, und für beide Varianten werden die zugrundeliegenden geometrischen Beziehungen abgeleitet. Darauf aufbauend wird für jede der beiden Ansätze eine Genauigkeitsbetrachtung zur Bestimmung der äußeren Orientierungsparameter mit Hilfe des Varianzfortpflanzungsgesetzes und der Ausgleichungsrechnung unter Einbeziehung der Monte Carlo Methode durchgeführt.

Die Ergebnisse der Genauigkeitsabschätzungen belegen, dass eine Positionsgenauigkeit im Subzentimeterbereich erreicht werden kann. Für die Orientierungswinkel ergeben sich Genauigkeiten bis zu etwa 0.2° . Somit erscheint eine solche Konzeption durchaus interessant für eine Umsetzung, insbesondere in solchen Bereichen, in denen

- 1) ein UAV aus Gewichtsgründen nicht mit zusätzlicher Sensorik ausgestattet werden soll und in denen
- 2) geodätisch-photogrammetrisches Equipment wie z. B. Videotachymeter und Kamera sowieso vorhanden ist, z. B. für Baustellenüberwachung.

1 Einleitung

Georeferenzierte Bilder in unterschiedlichsten Spektralbereichen, gewonnen mit Methoden der Fernerkundung von Flugzeugen und Satelliten aus, bilden als Geodaten die Grundlage für Geo-Informationssysteme. Die

Nachfrage an hochauflösenden und aktuellen Bildern wächst. Gerade bei kleineren Gebieten sind flugzeuggetragene klassische und digitale Luftbildsysteme aber sehr teuer und unflexibel und zudem an die Wetterlage, speziell Wolkenbildung, gebunden. Unmanned Aerial Vehicles (UAV) sind in der Lage, aus

geringeren Höhen unterhalb der Wolkendecke mit geringerer Geschwindigkeit sehr flexibel kleinere Gebiete zu überfliegen und Bilder bedarfsgerecht zu generieren. Heutige unbemannte Trägerplattformen verfügen teilweise über eine autonome Navigationseinheit, die sich mittels GNSS (global navigation satellite system) und IMU (inertial measurement unit) positioniert und stabilisiert und von einem Flight-Commander (Fernbedienung bzw. Autopilot) Befehle entgegennimmt. Solche UAVs sind in verschiedenen Formen und Typen bereits auf dem Markt (GRENZDÖRFFER & BILL 2010). Die Bandbreite reicht vom klassischen Motorsegler über Modellhelikopter und Quadrocopter bis hin zu neuartigeren Multicoptern. Einen Überblick zur Klassifizierung von UAVs bieten EISENBEISS et al. (2009). Mit einem Gesamtgewicht von bis zu 5 kg können modernere Systeme bis zu 1,2 kg Nutzlast für etwa 30 min Flugzeit tragen. Aktuelle leichte hochauflösende Kamerasysteme können somit in Verbindung mit UAVs für Luftbilder genutzt werden. Leider stellt sich die Georeferenzierung dieser Luftbilder oft als unzureichend heraus, da die GNSS-Position i.d.R. über das EGNOS-DGNSS (European Geostationary Navigation Overlay Service, Differential Global Navigation Satellite System) im Bereich von 1–3 m und die Rotationsparameter um die Koordinatenachsen durch die IMU auf wenige Grad zu ungenau abgebildet werden.

Dieser Beitrag verfolgt den Ansatz einer Bestimmung der Position und Orientierung durch ein terrestrisches Messsystem. Sensorwerte von IMU oder GNSS sollen hierbei keine Rolle spielen. Ziel ist eine theoretische Genauigkeitsbetrachtung der äußeren Orientierungsparameter, die mit Hilfe von zielverfolgenden Videotachymetern, Reflektoren und zusätzlichen Markierungen (kugelförmige, verschiedenfarbige Zielmarken) am UAV bestimmt werden können. Als a priori Genauigkeitsmaße gehen gängige Standardabweichungen der von den Messinstrumenten gelieferten Beobachtungen in die Abschätzung ein. Mit Hilfe des Varianzfortpflanzungsgesetzes bzw. der Ausgleichsrechnung wird eine Genauigkeitsanalyse durchgeführt, die sich in drei größere Bereiche aufteilt:

- i) Im ersten Bereich (Abschnitt 3) wird unter Berücksichtigung der Genauigkeiten

der Horizontalrichtungs-, Vertikalwinkel- und Distanzbeobachtungen des Tachymeters die Positionsgenauigkeit des UAV aus dem Einbild-Fall berechnet.

- ii) Der zweite Bereich (Abschnitte 4 & 5) beschreibt den Genauigkeitseinfluss der gemessenen Bildkoordinaten, der Kamerakonstanten, der Horizontalrichtungs-, Vertikalwinkel- und Distanzbeobachtungen als auch der Kalibriergenauigkeit auf die Position von Zielmarken am UAV sowohl für den Einbild-Fall über das Varianzfortpflanzungsgesetz als auch für den Mehrbild-Fall über die Ausgleichsrechnung mit integrierter Monte Carlo Simulation.
- iii) Der dritte Bereich (Abschnitt 6) benutzt die Positionsgenauigkeiten der Marken im UAV-eigenen und im übergeordneten Koordinatensystem für die Bestimmung der Genauigkeiten der sechs Parameter der äußeren Orientierung.

Erste Ergebnisse bestätigen die Konzeptidee und belegen, dass über die Kombination aus terrestrischer Zielverfolgung mittels Tachymeter und photogrammetrischer Vermessung der Trägerplattform im Umkreis von ca. 400 m die Positionen des UAV theoretisch mit einer Genauigkeit von ca. 1 cm und die Rotationsparameter mit bis zu 0.2° bestimmbar sind.

2 Idee zur terrestrischen Bestimmung der Position und Orientierung eines UAV von einem Standpunkt

Die präzise Bestimmung der Position und die Beschreibung der 3D-Trajektorie eines UAV in Echtzeit können durch verschiedene geodätische Verfahren erreicht werden. Für Anwendungen im Millimeter- bis Zentimeter-Bereich für die absolute Lage- und Höhengenauigkeit hat sich der Einsatz von zielverfolgenden Tachymetern als geeignetes Verfahren erwiesen (EISENBEISS et al. 2009). KIRSCHNER & STEMPFHUBER (2008) untersuchten die Leistungsfähigkeit von zielverfolgenden Tachymetern am Beispiel des Leica TPS 1200+ und erreichten bei ca. 50 m Zielweiten Ergebnisgenauigkeiten im Millimeterbereich. HENNES (2008) be-

beschäftigte sich zudem mit der Bestimmung der kompletten äußeren Orientierung über eine rotierende Scheibe, auf der ein Reflektor exzentrisch montiert ist, dessen Position wiederum permanent, präzise und sehr schnell von einem zielfollowenden Lasertracker bestimmt wird. Über die Kreisbahn des Reflektors lässt sich der Kreismittelpunkt (Messpunkt), aber auch die Lage der Kreisebene (Kreisnormale) bestimmen. Der Arbeitsradius dieses Systems wurde mit 24 m und $\pm 30^\circ$ angegeben. Die angegebenen Genauigkeiten liegen im μrad - bzw. μm -Bereich. Alternativ dazu existiert bereits das T-Probe und T-Cam-System (DOLD 2004), bei dem ein Kamerasytem mit einem Lasertracker kombiniert ist. Das Zielsystem (T-Probe-Taster) besteht aus einem Reflektor und mehreren LEDs, deren relative Positionen hochgenau bekannt sind. Der Lasertracker bestimmt die Position des Reflektors. Die Positionen der LEDs lassen sich dann über die Bildinformation der Kamera bestimmen. Über diese LEDs als homologe Punkte können anschließend die 6 Parameter der äußeren Orientierung des T-Probe bestimmt werden.

Das T-Probe- bzw. T-Cam-Grundprinzip wird in diesem Beitrag aufgegriffen und die theoretischen Genauigkeiten der Parameter der äußeren Orientierung für eine Tachymeter-Kamera-Kombination unter bestimmten Annahmen berechnet. Diese Konstellation hat den großen Vorteil, dass ein UAV kein zusätzliches Gewicht in Form von Sensoren aufnehmen muss und somit mehr Nutzlast für

die eigentlichen Messeinheiten zur Verfügung steht. Das Gewicht der Zielmarken ist sehr gering (Styroporhölle) und kann vernachlässigt werden.

Ein motorisiertes Tachymeter soll im Automatic Target Recognition-Modus (ATR) kontinuierlich die Position eines 360° -Prismas an der Unterseite des UAV (siehe Abb. 1) in einem übergeordneten Koordinatensystem bestimmen. Zusätzlich soll das Tachymeter um eine Kamera mit einer Festbrennweite erweitert werden. Einige Tachymetersysteme bieten bereits integrierte Kameras an.

Das Videobild, das durch die Zielfollowung ständig das UAV abbildet, wird genutzt, um die Positionen der angebrachten und abgebildeten Marken am UAV zu berechnen (Einbildphotogrammetrie mit Nebenbedingungen nach LUHMANN et al. 2006). Die Positionen der Marken und des Reflektors (siehe Abb. 2) sollen durch Kalibrierung im UAV-eigenen Koordinatensystem hochgenau bekannt sein.

Liegen mindestens drei nicht kollineare Messmarkenpositionen vor, ist eine Bestimmung der 3D-Transformationsparameter möglich. Liegen mehr als drei Markenpositionen vor, erhält man durch die Überbestimmung eine Genauigkeitssteigerung. Je mehr Markenpositionen bekannt sind, umso genauer und zuverlässiger können die Parameter der äußeren Orientierung bestimmt werden.

Zusätzlich ist eine Genauigkeitssteigerung möglich, indem man auf weiteren koordinatenmäßig bekannten Standpunkten zielfollowende Kameras nutzt, die auf sogenannten PAN/TILT-Units installiert sind (Mehrbildauswertung nach LUHMANN et al. 2006). Es

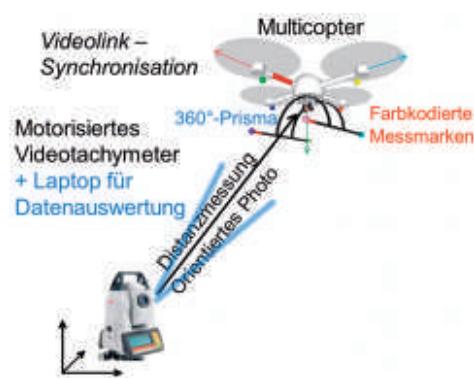


Abb. 1: Aktives Tracking mit Hilfe eines motorisierten Tachymeters und aufgesetzter Kamera – Einbild-Lösung.

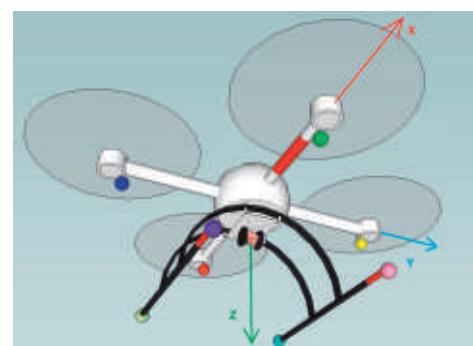


Abb. 2: UAV mit Reflektor und z.B. 8 farbkodierte Messmarken.

können so mehr Marken bzw. einige Marken redundant abgebildet und die Position der Marken unter günstigeren geometrischen Schnitten berechnet werden.

3 Bestimmung der UAV-Reflektorposition und deren Genauigkeit

3.1 Bestimmung der Position des UAV mit Hilfe des Tachymeters

Über eine Basisrichtung vom Tachymeterstandpunkt (ST1) zu einem zweiten Standpunkt (ST2) kann ein lokales Koordinatensystem sehr einfach erzeugt werden (Abb. 3), welches für die hier angestellten Berechnungen als übergeordnetes Objektkoordinatensystem fungiert. Der Koordinatenursprung sei zur Vereinfachung in den Tachymeterstandpunkt ST1 gelegt. Die Koordinaten von ST2 ergeben sich dann zu $X_{ST2} = '0'$, $Y_{ST2} = 'horizontaler Abstand zu ST1'$ und $Z_{ST2} = 'vertikaler Höhenunterschied zu ST1'$.

Der Richtungswinkel zwischen ST1 und ST2 (t_{ST1}^{ST2}) beträgt hierbei 90° . Aus den vorgegebenen Bedingungen und den Messelementen ergeben sich durch einfaches räumliches polares Anhängen (RESNIK & BILL 2009) die Gleichungen (2), (3) und (4) für die Berechnung der Koordinaten des UAV.

$$\alpha = H_{ST1}^{ST2} - H_{ST1}^{\text{UAV}} \quad (1)$$

$$Y_{\text{UAV}} = Y_{ST1} + \sin(t_{ST1}^{ST2} - \alpha) \cdot \sin(V_{ST1}^{\text{UAV}}) \cdot s_{ST1}^{\text{UAV}} \quad (2)$$

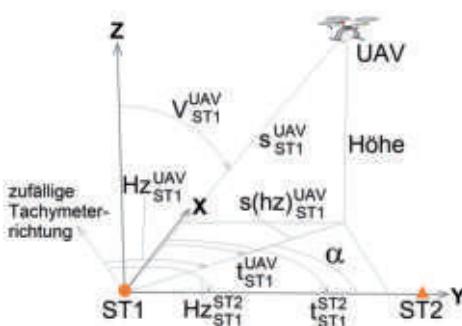


Abb. 3: Zusammenhang Tachymettermessung und Koordinatensystem.

$$X_{\text{UAV}} = X_{ST1} + \cos(t_{ST1}^{ST2} - \alpha) \cdot \sin(V_{ST1}^{\text{UAV}}) \cdot s_{ST1}^{\text{UAV}} \quad (3)$$

$$Z_{\text{UAV}} = Z_{ST1} + \cos(V_{ST1}^{\text{UAV}}) \cdot s_{ST1}^{\text{UAV}} \quad (4)$$

Hz_{ST1}^{ST2} und Hz_{ST1}^{UAV} sind die Horizontalrichtungen vom Standpunkt ST1 jeweils zu ST2 und zum Reflektor am UAV. V_{ST1}^{UAV} ist der Vertikalwinkel und s_{ST1}^{UAV} die Schrägstrecke von ST1 zum Reflektor am UAV.

3.2 Genauigkeitsbetrachtung für die UAV-Position mit dem Tachymeter

Mit (1) bis (4) kann die Genauigkeitsabschätzung für die kartesischen Koordinaten des UAV über das Varianzfortpflanzungsgesetz berechnet werden. Die Varianzen aller Beobachtungsgrößen stehen dabei in einer festgelegten Reihenfolge auf der Hauptdiagonalen in der Kovarianzmatrix C_{ll} . Die Beobachtungen sollen zur Vereinfachung als unkorreliert angenommen werden. Es ergibt sich eine Diagonalmatrix. Alle partiellen Ableitungen von (2) bis (4) nach den Beobachtungen sind in der Funktionalmatrix F in entsprechender festgelegter Reihenfolge nach bekanntem Schema gesammelt.

Mit (5) lässt sich die Kovarianzmatrix der drei Unbekannten (C_{xx}) und damit deren Varianzen und Korrelation bestimmen.

$$C_{xx} = F \cdot C_{ll} \cdot F^T \quad (5)$$

3.3 Ergebnisse zur Genauigkeit der UAV-Position mit dem Tachymeter

Für die Berechnung der Varianzen der UAV-Koordinaten wurden die obigen Formeln in Matlab programmiert. Es wurden mehrere Positionen und deren Varianzen im Raum um den Standpunkt ST1 (Abb. 4, Zentrum) berechnet. Die angenommenen Standardabweichungen für die Beobachtungen betragen 0.0009° für Horizontal- und Vertikalrichtungen und $1 \text{ mm} + 1 \text{ ppm}$ für die Streckenmessungen. Hierbei handelt es sich um Werte, die

von moderneren Tachymetern wie z. B. dem Trimble S8 (TRIMBLE 2011) oder dem Leica VIVA15 (LEICA 2011) erreicht werden. Um die Abbildungen nicht zu sehr mit Fehlerelipsoiden zu überhäufen, wird stattdessen der Gesamtpunktfehler (GPF) dargestellt, der sich nach (6) aus den Varianzen der bestimmten Position (X,Y,Z) berechnen lässt.

$$\text{GPF} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2} \quad (6)$$

Abb. 4 zeigt die berechneten Gesamtpunktfehler der einzelnen Positionen farblich abgestuft um ST1. In einer Entfernung von beispielsweise 200 m erhält man in Abhängigkeit von der Steilheit der Visur einen Fehler zwischen 3 und 6 mm. Im Radius von 400 m treten Gesamtpunktfehler zwischen 8 mm und 1 cm auf.

Man erkennt, dass die Gesamtpunktfehler unabhängig von der horizontalen Entfernung sind. Anhand der vertikalen Schnitte kann man die Abhängigkeit von der Steilheit der Visur erkennen. Je steiler die Visur, desto geringer wird der Punktfehler. Dies liegt im funktionalem Modell begründet, da bei den Ableitungen der Sinus bzw. der Cosinus des Vertikalwinkels als Faktor Einfluss ausübt. Die Ergebnisse spiegeln das theoretische Fehlerverhalten nach Anwendung des Varianzfortpflanzungsgesetzes wider. Weitere Fehlerinflüsse wie Refraktion etc. wurden nicht berücksichtigt.

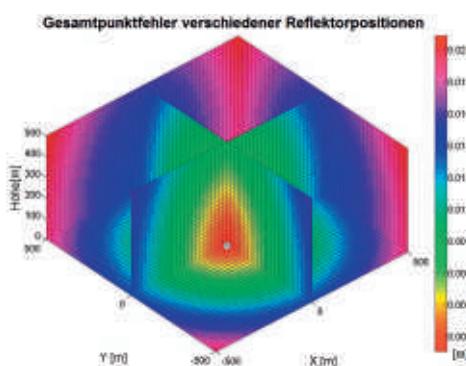


Abb. 4: Gesamtpunktfehler für verschiedene Reflektorpositionen.

4 Bestimmung der Position einer Marke am UAV und deren Genauigkeit

4.1 Bestimmung der Markenposition am UAV mit Hilfe der Einbild-Photogrammetrie

Das synchronisierte mitgeführte Videobild liefert in Kombination mit den Tachymetremessungen die Positionen der einzelnen Marken im Raum. Folgende Bedingungen sollen zur Vereinfachung der Genauigkeitsberechnungen während der Bildaufnahme vorliegen.

1. Die Ziellinie zum Reflektor am UAV muss senkrecht zur Bildebene liegen.
2. Die X-Achse des Bildkoordinatensystems sollte parallel zur Kippachse des Tachymeters liegen.
3. Das Projektionszentrum der Kamera sollte im Achsschnittpunkt des Tachymeters liegen.

Abb. 5 verdeutlicht den mathematischen Zusammenhang zwischen Tachymetremessung und Bildmessung. Die Strecke $s_{\text{ST1}}^{\text{UAV}}$ wird mit dem Tachymeter zum Reflektor am UAV bestimmt. Die konstante Strecke $s_{\text{UAV}}^{\text{Marke}}$ wird über Kalibrierung bestimmt. Eine solche Kalibrierung könnte photogrammetrisch mit Genauigkeiten im Submillimeterbereich erfolgen. Um die Entfernung zwischen Projektionszentrum und Marke ($s_{\text{ST1}}^{\text{Marke}}$) zu berechnen, wird der Winkel ϵ mit Hilfe der Bildkoordinaten der Marke und der Kamerakonstanten bestimmt.

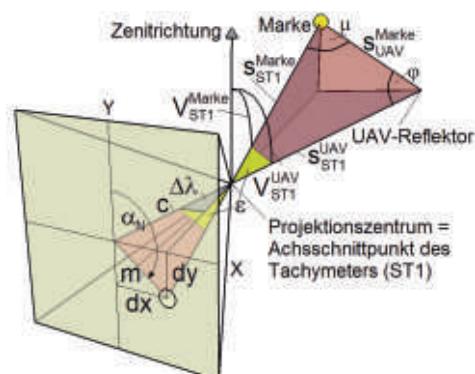


Abb. 5: Mathematische Beziehungen zwischen Tachymeter- und Bildmessung.

Der Winkel ε kann eine beliebige Lage im Raum annehmen und wird daher in einen Vertikal- und Horizontalwinkelanteil zerlegt.

Da die Richtungsmessung am Tachymeter ähnlich der Längen- und Breitenmessung an einer Kugel ist (Achsschnittpunkt des Tachymeters im Zentrum der Kugel), gibt es bei der Berechnung der horizontalen und vertikalen Richtungskomponente bei steileren Visuren sphärische Einflüsse, die berücksichtigt werden müssen, um eine mathematisch korrekte Grundlage für das Varianzfortpflanzungsgesetz zu erhalten.

JURETZKO (2005) beschreibt den exakten geometrischen Zusammenhang zwischen Bildkoordinaten und Theodolitrichtungen. Er nimmt dabei Bezug auf die schiefachsige gnomonische Abbildung. Dabei wird die Richtungsmessung des Tachymeters mit der Längen- und Breitenkreismessung an einer Kugel gleichgesetzt. Die Stehachse (Z-Achse) zeigt in Zenitrichtung. Die X- und Y-Achse liegen in der Horizontalebene und stehen rechtwinklig zueinander (Abb. 6).

Da die Zielachse des Videotachymeters für den betrachteten Fall senkrecht durch den Bildhauptpunkt der Kamerabildebene geht, kann man sich für die Bildebene eine tangentiale Ebene an der Kugeloberfläche mit dem Radius der Kamerakonstanten vorstellen. Der Schnittpunkt des Lichtstrahls vom Objekt durch den Kugelmittelpunkt und die Bildebene ergibt die Bildkoordinaten (gnomonische Beziehung).

Die Formeln von JURETZKO (2005) beschreiben den rechentechnischen Weg von den

Tachymeterbeobachtungen zu den Bildkoordinaten, beispielsweise einer Marke. Zur Bestimmung der Tachymeterrichtungen aus den Bildkoordinaten und den Tachymeterbeobachtungen zum UAV-Reflektor wird dieser Rechenweg invertiert.

Gemessen werden die Bildkoordinaten dx und dy sowie die Horizontalrichtung, der Vertikalwinkel und die Schrägstrecke zum UAV-Reflektor. Die Kamerakonstante c und der Abstand vom Reflektor zur Marke seien durch Kalibrierung bekannt. Die Fallunterscheidung, wo sich die Marke auf dem Zielstrahl befindet (weiter vorne oder weiter hinten), soll gelöst vorliegen. Diese Mehrdeutigkeit kann z. B. durch kodierte Marken oder unterschiedliche Farbe an Vor- und Rückseite gelöst werden.

Die Formeln von JURETZKO (2005) beziehen sich auf ein Koordinatensystem, bei dem sich der Nordpol bei 90° und die Äquatorebene (bzw. Horizontalebene) bei 0° befinden. Daher muss vorher der Vertikalwinkel im Tachymetersystem zum UAV-Reflektor umgerechnet werden (7).

$$\Phi_{\text{ST1}}^{\text{UAV}} = \frac{\Pi}{2} - V_{\text{ST1}}^{\text{UAV}} \quad (7)$$

In Abb. 5 sind in der Kamerabildebene die polaren und die kartesischen Bildkoordinaten der abgebildeten Marke dargestellt. Der Richtungswinkel α_N sowie die Strecke m lassen sich aus (8) und (9) herleiten.

$$\alpha_N = \arctan\left(\frac{dx}{dy}\right) + \text{Quadrant} \quad (8)$$

$$m = \sqrt{dx^2 + dy^2} \quad (9)$$

Aus m und c lässt sich dann der Winkel ε berechnen.

$$\varepsilon = \arctan\left(\frac{m}{c}\right) \quad (10)$$

Hier ist eine Quadrantenabfrage nicht notwendig, da der Abstand m und die Kamerakonstante c immer positiv sind. Mit (11) lässt sich aus α_{n_1} , ϕ_{STL}^{UAV} und ε nun ϕ_{STL}^{Marke} berechnen.



Abb. 6: Prinzip der gnomonischen Projektion.

$$\begin{aligned}\varphi_{\text{STI}}^{\text{Marke}} = \arcsin(\cos(\alpha_N) \cdot \cos(\varphi_{\text{STI}}^{\text{UAV}}) \cdot \sin(\varepsilon) \\ + \sin(\varphi_{\text{STI}}^{\text{UAV}}) \cdot \cos(\varepsilon))\end{aligned}\quad (11)$$

Da $\varphi_{\text{STI}}^{\text{Marke}}$ im Kugelsystem berechnet wurde, muss eine Rückumformung ins Tachymetersystem durchgeführt werden (12).

$$V_{\text{STI}}^{\text{Marke}} = \frac{\Pi}{2} - \varphi_{\text{STI}}^{\text{Marke}} \quad (12)$$

Aus α_N , $\varphi_{\text{STI}}^{\text{Marke}}$ und ε lässt sich nun $\Delta\lambda$ bestimmen (13).

$$\Delta\lambda = \arcsin\left(\frac{\sin(\alpha_N) \cdot \sin(\varepsilon)}{\cos(\varphi_{\text{STI}}^{\text{Marke}})}\right) \quad (13)$$

Um die Horizontalrichtung zur Marke bzgl. der Horizontalrichtung zum UAV-Reflektor zu bekommen, muss der Winkel aus (13) addiert werden (14).

$$Hz_{\text{STI}}^{\text{Marke}} = Hz_{\text{STI}}^{\text{UAV}} + \Delta\lambda \quad (14)$$

Abb. 5 veranschaulicht zudem die sich anschließende Berechnung der Strecke $s_{\text{STI}}^{\text{Marke}}$.

Über den Sinussatz lässt sich aus dem Winkel ε und den Strecken $s_{\text{STI}}^{\text{UAV}}$ und $s_{\text{UAV}}^{\text{Marke}}$ der Winkel μ berechnen (15).

$$\mu = \arcsin\left(\frac{s_{\text{STI}}^{\text{UAV}}}{s_{\text{UAV}}^{\text{Marke}}} \cdot \sin(\varepsilon)\right) \quad (15)$$

Zu beachten ist, dass die Berechnung des Winkels μ für diese Konstellation der Ein-gangswerte nicht eindeutig ist. Die Funktion „ \arcsin “ ist zwischen den Werten -1 und 1 definiert, liefert also nur Werte zwischen -90° und 90° . Liegt eine Zielmarke im Bereich zwischen Projektionszentrum und UAV-Reflektor, so wird μ größer als 90° . In diesem Fall muss der Komplementärwinkel benutzt werden.

Der Winkel ϕ lässt sich über die Innenwinkelsumme im Dreieck bestimmen (16).

$$\phi = \Pi - (\varepsilon + \mu) \quad (16)$$

Die Strecke zwischen dem Tachymeter (Projektionszentrum) und der Marke kann jetzt über den Kosinussatz bestimmt werden (17).

$$s_{\text{STI}}^{\text{Marke}} = \sqrt{(s_{\text{STI}}^{\text{UAV}})^2 + (s_{\text{UAV}}^{\text{Marke}})^2 - 2s_{\text{STI}}^{\text{UAV}} s_{\text{UAV}}^{\text{Marke}} \cos(\phi)} \quad (17)$$

Die Koordinaten der Marke ergeben sich dann aus den Formeln des räumlichen polaren Anhangens.

$$\beta = t_{\text{STI}}^{\text{ST2}} - Hz_{\text{STI}}^{\text{ST2}} + Hz_{\text{STI}}^{\text{Marke}} \quad (18)$$

$$Y_{\text{Marke}} = Y_{\text{STI}} + \sin(\beta) \cdot \sin(V_{\text{STI}}^{\text{Marke}}) \cdot s_{\text{STI}}^{\text{Marke}} \quad (19)$$

$$X_{\text{Marke}} = X_{\text{STI}} + \cos(\beta) \cdot \sin(V_{\text{STI}}^{\text{Marke}}) \cdot s_{\text{STI}}^{\text{Marke}} \quad (20)$$

$$Z_{\text{Marke}} = Z_{\text{STI}} + \cos(V_{\text{STI}}^{\text{Marke}}) \cdot s_{\text{STI}}^{\text{Marke}} \quad (21)$$

4.2 Genauigkeitsbetrachtung für die Markenpositionen mit Hilfe der Einbild-Photogrammetrie

Die Gleichungen (7) bis (21) können im Varianzfortpflanzungsgesetz angewendet werden, um die Genauigkeiten der Markenpositionen zu bestimmen. Wegen der Komplexität und der Verästelungen im Rechenweg bietet sich die verschachtelte Varianzfortpflanzung an, bei der die funktionalen Zusammenhänge auf mehrere Funktionalmatrizen verteilt werden.

Die Beobachtungen sind die Bildkoordinaten dx und dy sowie die Kamerakanstante c , die Horizontalrichtung $Hz_{\text{STI}}^{\text{UAV}}$ sowie $Hz_{\text{STI}}^{\text{ST2}}$, der Vertikalwinkel $V_{\text{STI}}^{\text{UAV}}$ und die Strecken $s_{\text{STI}}^{\text{UAV}}$ sowie $s_{\text{STI}}^{\text{Marke}}$. Zur Vereinfachung der Berechnungen sollen alle Beobachtungen untereinander als unkorreliert angenommen werden, was bei der Trennung der Beobachtungen in Tachymeter- bzw. Kameramesswerte durchaus gerechtfertigt ist. Die Varianzen stehen auf der Hauptdiagonalen in der Kovarianzmatrix C_{II} in festgehaltener Reihenfolge. Die verkettete Varianzfortpflanzung wird in 6 Unterfunktionalmatrizen aufgegliedert (22).

$$\begin{array}{l}
 \begin{matrix}
 dx & \left[\begin{array}{c} \varphi_{ST1}^{UAV} \\ \alpha_N \\ m \\ c \\ s_{ST1}^{UAV} \\ s_{Marke}^{UAV} \\ Hz_{ST1}^{ST2} \\ Hz_{ST1}^{UAV} \\ v_{ST1}^{UAV} \end{array} \right] \\
 dy & \rightarrow F_1 \rightarrow \left[\begin{array}{c} \varphi_{ST1}^{UAV} \\ \alpha_N \\ m \\ c \\ s_{ST1}^{UAV} \\ s_{Marke}^{UAV} \\ Hz_{ST1}^{ST2} \\ Hz_{ST1}^{UAV} \\ Hz_{ST1}^{UAV} \end{array} \right] \\
 c & \rightarrow F_2 \rightarrow \left[\begin{array}{c} \varepsilon \\ \varphi_{ST1}^{UAV} \\ \alpha_N \\ m \\ s_{ST1}^{UAV} \\ s_{Marke}^{UAV} \\ Hz_{ST1}^{ST2} \\ Hz_{ST1}^{UAV} \\ Hz_{ST1}^{UAV} \end{array} \right] \\
 c_{UAV} & \rightarrow F_3 \rightarrow \left[\begin{array}{c} \mu \\ \varphi_{ST1}^{Marke} \\ \varepsilon \\ \alpha_N \\ s_{UAV}^{ST1} \\ s_{Marke}^{UAV} \\ s_{UAV}^{ST1} \\ s_{Marke}^{UAV} \\ s_{UAV}^{ST1} \end{array} \right] \\
 c_{UAV} & \rightarrow F_4 \rightarrow \left[\begin{array}{c} \varphi \\ \Delta\lambda \\ V_{ST1}^{Marke} \\ s_{ST1}^{Marke} \\ s_{UAV}^{ST1} \\ s_{Marke}^{UAV} \\ Hz_{ST1}^{ST2} \\ Hz_{ST1}^{UAV} \\ Hz_{ST1}^{UAV} \end{array} \right] \\
 c_{UAV} & \rightarrow F_5 \rightarrow \left[\begin{array}{c} HZ_{ST1}^{Marke} \\ s_{ST1}^{Marke} \\ V_{ST1}^{Marke} \\ Hz_{ST1}^{ST2} \\ Hz_{ST1}^{UAV} \end{array} \right] \\
 c_{UAV} & \rightarrow F_6 \rightarrow \left[\begin{array}{c} Y_{Marke} \\ Z_{Marke} \end{array} \right]
 \end{matrix}
 \end{array}
 \quad (22)$$

In F_1 sind (7), (8), (9), in F_2 (10), in F_3 (11), (15), in F_4 (12), (13), (16), in F_5 (14), (17) und in F_6 (19), (20) als Ableitungen nach den Beobachtungen in entsprechender Reihenfolge enthalten. Später benötigte Beobachtungsvarianzen werden in den Funktionalmatrizen durchgereicht. Die Kovarianzmatrix der Koordinaten der Marke berechnet sich nach (23).

$$\begin{aligned}
 C_{xx(\text{Marke})} = & \\
 F_6 \cdot F_5 \cdot F_4 \cdot F_3 \cdot F_2 \cdot F_1 \cdot C_{ll} \cdot & F_1^T \cdot F_2^T \cdot F_3^T \cdot F_4^T \cdot F_5^T \cdot F_6^T
 \end{aligned}
 \quad (23)$$

4.3 Ergebnisse zur Genauigkeit der Markenpositionen mit Hilfe der Einbild-Photogrammetrie

4.3.1 Verhalten des Gesamtpunktfilters

Die jeweils zu bestimmende Marke, der Reflektor und das Tachymeter spannen im Raum ein Dreieck auf. Der Reflektor sollte im Schwerpunkt des UAV montiert sein. Um schleifende Schnitte (spitzwinklige Dreiecke) zu vermeiden, sollte die Marke so weit wie möglich vom Reflektor entfernt sein. Für die Genauigkeitsbetrachtungen wurden für verschiedene Markenpositionen mit dem maximal möglichen Abstand rund um den Reflektor die Gesamtpunktfehler nach (5) berechnet und farbcodiert dargestellt. Der maximale Abstand zwischen Marke und Reflektor soll in Anlehnung an die Ausmaße einer MD4-1000 von der Firma microdrones 50 cm betragen.

Abb. 7 zeigt ein charakteristisches Verhalten des Gesamtpunktfilters rund um den Reflektor. Man erkennt, dass der Gesamtpunktfehler

stark von der Aufnahmegeometrie abhängt und sich extrem an den tangentialen Schnittpunkten des Sehstrahls an der Kugeloberfläche auswirkt (dunkelrot, Fehler größer 20 cm). Grund ist die ungünstige Schnittgeometrie. Die Entfernung zwischen Tachymeter und Reflektor sowie zwischen Reflektor und Marke sind bekannt, ebenso der Winkel ε . Für den Fall, dass der Winkel an der Marke 90° beträgt, entsteht ein schleifender Schnitt. Das bedeutet, wenn ε sich nur gering verändert, verändert sich die Position der Marke und damit die Entfernung zwischen ST1 und Marke sehr stark. Gut zu erkennen ist auch, dass der größte Teil der Markenpositionen dunkelgrün bis hellgrün ist und damit Punktfehler unter 1 cm für diese Konstellation dominieren. Der tatsächliche Punktfehler einer Marke hängt also sehr stark von seiner Position in Relation zum Reflektor und dem Tachymeter ab. Wichtig ist, dass sich genügend Marken in günstigen Schnittbereichen befinden. Da sich das Genauigkeitsverhalten ringförmig auf einer Kugeloberfläche äußert, kann man schon mit relativ wenigen Punkten die Genauigkeitsgrenzen approximieren.

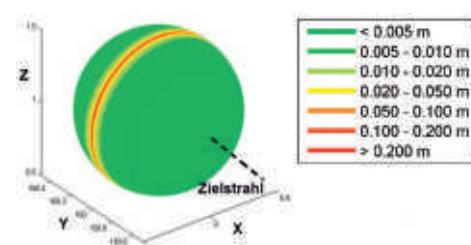


Abb. 7: Gesamtpunktfehler der Markenposition rund um den Reflektor.

4.3.2 Berechnungen zum Einfluss von einzelnen Beobachtungen und deren Genauigkeiten

Tab. 1 gibt einen Überblick über den Einfluss der einzelnen Beobachtungen bei Verschlechterung um eine Zehnerpotenz. Da davon ausgegangen werden kann, dass sich der Gesamtpunktfehler mit zunehmender Entfernung verschlechtert, wird das Fehlerverhalten in maximaler Weite vom Beobachter bestimmt. Nach § 16 Abs. 7 der Luftverkehrsordnung (LUFTVO 2010) ergibt sich für Deutschland u.a., dass auf Sicht (ohne Hilfsmittel) und maximal 1.000 Fuss (ca. 300 m) hoch geflogen werden darf. Das UAV soll daher für die Berechnungen als 250 m in X-, Y- und Z-Richtung entfernt (Abstand demnach 433 m) angenommen werden. Auf diese Entfernung ist beispielsweise eine MD4-1000 von microdrones mit ca. 1 m Durchmesser mit bloßem Auge sehr schwer zu erkennen. Die Entfernung zwischen Tachymeter und UAV-Reflektor stellt also bezüglich der Sichtbarkeit

des UAV den Extremfall dar. Die angegebenen Referenzgenauigkeiten entsprechen den technischen Daten heutiger Tachymeter. Die Genauigkeiten der Bildkoordinaten beziehen sich auf die automatische Erkennbarkeit von kreis- bzw. ellipsenförmigen Objekten. LUHMANN (2006) untersuchte den Zusammenhang zwischen Flächengröße (Pixelanzahl) und Genauigkeit des Mittelpunkts nach Schwerpunktmetode, Kleinste-Quadrate-Methode und Ellipsen-Operator. Die Kamera ist so zu wählen, dass das Zielobjekt (Messmarke) mit einem Durchmesser von mindestens 5 Pixeln abgebildet wird. LUHMANN (2006) gibt bei 5 Pixeln eine empirisch ermittelte Genauigkeit von ca. 0.014 Pixeln an. Da im Einsatz später keine Laborbedingungen vorherrschen, wird die Pixelgenauigkeit von 0.1 Pixel angenommen. Bei einer Pixelgröße von 5–7 µm (heutige digitale Kamerasensoren) würde somit eine Genauigkeit von 0.5–0.7 µm resultieren. Daher sind die angenommenen Genauigkeiten der Bildkoordinaten der Messmarke als realistisch anzunehmen.

Tab. 1: Einfluss der Genauigkeit der Bildkoordinaten, der Kamerakonstanten und der Tachymeterbeobachtungen $s_{ST1}^{UAV} = \text{ca. } 433 \text{ m}$, $\text{Hz}_{ST1}^{UAV} = \text{konstant}$, $V_{ST1}^{UAV} = 35,1^\circ$.

Bezeichnung	Referenzwerte	Bildkoordinaten & Kamera- konstante	Distanzmessung	Winkelmessung
$\sigma_{dx} (\mu\text{m})$	1	10	1	1
$\sigma_{dy} (\mu\text{m})$	1	10	1	1
$\sigma_c (\mu\text{m})$	10	100	10	10
$\sigma_s (\text{m})$	0.001	0.001	0.01	0.001
ppm (m)	0.001	0.001	0.01	0.001
$\sigma_{s_{UAV}^{\text{Mate}}} (\text{m})$	0.001	0.001	0.001	0.001
$\sigma_{\text{Hz}_{ST1}^{UAV}} (\text{)}^\circ$	0.0009	0.0009	0.0009	0.009
$\sigma_{\text{Hz}_{ST1}^{UAV}} (\text{)}^\circ$	0.0009	0.0009	0.0009	0.009
$\sigma_{V_{ST1}^{UAV}} (\text{)}^\circ$	0.0009	0.0009	0.0009	0.009
< 0.005 m (%)	0	0	0	0
0.005 – 0.010 m (%)	0	0	0	0
0.010 – 0.020 m (%)	85.93	0	74.20	0
0.020 – 0.050 m (%)	9.18	50.55	20.71	0
0.050 – 0.100 m (%)	2.48	27.12	2.67	0
0.100 – 0.200 m (%)	1.20	11.42	1.21	98.60
> 0.200 m (%)	1.18	10.91	1.19	1.39

Die Innere Orientierung einschließlich der Kamerakonstante ist vielen variablen Einflüssen, z. B. Temperatur, Luftdruck etc., unterworfen (WASMEIER 2009). Daher ist eine einfache Kalibrierung vor dem tatsächlichen Einsatz erforderlich. Als Ergebnis der Kalibrierung ist eine Genauigkeit der Kamerakonstante von $\pm 10 \mu\text{m}$ realistisch. Das UAV hat bis zu 30 min Flugzeit. Lediglich für diesen Zeitraum soll die automatische Zielerfassung inklusive Bildmessung stattfinden.

In Tab. 1 sieht man in den ersten 9 Zeilen die angenommenen Genauigkeiten der Beobachtungen. Der Vertikalwinkel beträgt 35.1° und die Horizontalrichtung ist konstant. Mit sehr guten Beobachtungsgenauigkeiten (Spalte 2 Referenzwerte) ergeben sich keine Punktgenauigkeiten unter 1 cm. Jedoch befinden sich ca. 86 % der Kugeloberfläche (gemäß Abb. 7) im Bereich von 1 bis 2 cm (Gelb-Grün) und ca. 9 % im Bereich von 2 bis 5 cm (Gelb).

In Spalte 3 wird der Genauigkeitsbereich der Bildkoordinaten als auch der Kamerakonstanten um eine Zehner-Potenz verschlechtert. Das reicht aus, dass keine Gesamtpunktfehler unter 2 cm vorhanden sind. Ca. 50 % der Kugeloberfläche liegen im Bereich von 2 bis 5 cm (Gelb). Ca. 27 % liegen im Bereich von 5 bis 10 cm. Der Rest ist schlechter als 10 cm.

In der Spalte 4 werden die Streckengenauigkeit und der streckenmäßige Fehleranteil verzehnfacht. Ca. 74 % der Kugeloberfläche liegen im Bereich von 1 bis 2 cm. Im Vergleich mit Spalte 2 hat sich der Bereich von 2 bis 5 cm jedoch von ca. 10 % auf ca. 20 % gut verdoppelt.

In Spalte 5 wurden die Genauigkeiten der Winkelmessung sowohl horizontal als auch vertikal verzehnfacht. Durch diese Verschlechterung sind keine Punktfehler unter 10 cm mehr vorhanden. Ca. 98 % der Kugeloberfläche weisen Punktfehler innerhalb von 10 bis 20 cm auf. Dieser Fehlereinfluss erscheint sehr stark, ist aber eine Folge der großen Entfernung zwischen Tachymeter und UAV.

Die Genauigkeiten der Winkelmessung (Spalte 5) und die Genauigkeiten der Bildkoordinaten und der Kamerakonstanten (Spalte 3) haben einen großen Einfluss auf die Genauigkeit der Markenpositionen. Der Fehlereinfluss der Streckenmessung hat im Vergleich dazu eher mäßigen Einfluss.

4.3.3 Berechnungen in Abhängigkeit von der Aufnahmegeometrie

Nachfolgend soll nun untersucht werden, welchen Einfluss die Aufnahmegeometrie auf die Genauigkeit der Markenpositionen ausübt. Dabei wurde von folgenden Genauigkeiten ausgegangen: $\sigma_{dx} = \sigma_{dy} = 1 \mu\text{m}$, $\sigma_c = 10 \mu\text{m}$, $\sigma_s = 1 \text{ mm} + 1 \text{ ppm}$, $\sigma_{s_{\text{Mark}}^{\text{UAV}}} = 0.001 \text{ m}$, $\sigma_{Hz_{\text{STI}}^{\text{STI}}} = \sigma_{Hz_{\text{STI}}^{\text{UAV}}} = \sigma_{v_{\text{UAV}}^{\text{STI}}} = 0.0009^\circ$. Die Entfernung zwischen Tachymeter und UAV-Reflektor soll nun 100 m betragen, damit Gesamtpunktfehler unter 5 mm erreicht werden.

Abb. 8a zeigt die Ergebnisse des Genauigkeitsverhaltens bei steiler werdenden Visuren. Im Diagramm sind prozentual die Anteile der Kugeloberfläche, die den jeweiligen Genauigkeiten entsprechen, für Vertikalwinkel zwischen 25° und 90° gegenübergestellt. Man erkennt, dass mit flacher werdender Visur der prozentuale Anteil des Genauigkeitsbereichs bis 5 mm fällt und der prozentuale Anteil für den Genauigkeitsbereich zwischen 5 mm bis 1 cm gleichzeitig ansteigt. Das korreliert mit den Ergebnissen der Genauigkeit der UAV-Position beim Tracken.

Abb. 8b zeigt die Untersuchungsergebnisse für das Genauigkeitsverhalten für verschiedene Horizontalrichtungen. Das Genauigkeitsverhalten ist konstant und somit unabhängig von Horizontalrichtungen.

In Abb. 8c wird die Abhängigkeit von der Entfernung gezeigt. Auch hier ist zu erkennen, dass sich mit größer werdender Distanz die Positionsgenauigkeit der Marke verschlechtert. Bei 300 m sind lediglich ca. 2/3 der Kugeloberfläche im Bereich von 5 mm bis 1 cm. Bei 350 m schwindet dieser Anteil auf ca. 9 %. Der Anteil der Kugeloberfläche im Bereich von 1 bis 2 cm liegt ab 350 m bis 500 m jedoch immer noch im Bereich zwischen 80 % und 75 %.

In Abb. 8d sind die Ergebnisse für etwas schlechtere Genauigkeitsvorgaben aufgezeigt. σ_{dx} , σ_{dy} und σ_c liegen hier bei $10 \mu\text{m}$. Die Streckenmessung weist eine Genauigkeit von $\sigma_s = 5 \text{ mm} + 5 \text{ ppm}$, $\sigma_{s_{\text{Mark}}^{\text{UAV}}} = 0.005 \text{ m}$ auf und die Vertikal- ($\sigma_{v_{\text{STI}}^{\text{STI}}}$) als auch die Horizontalwinkelmessung ($\sigma_{Hz_{\text{STI}}^{\text{STI}}}$, $\sigma_{Hz_{\text{STI}}^{\text{UAV}}}$) sollen 0.0045° genau sein.

Das Gesamtpunktfehlerverhalten verschlechtert sich deutlich. Bis zu einer Entfernung

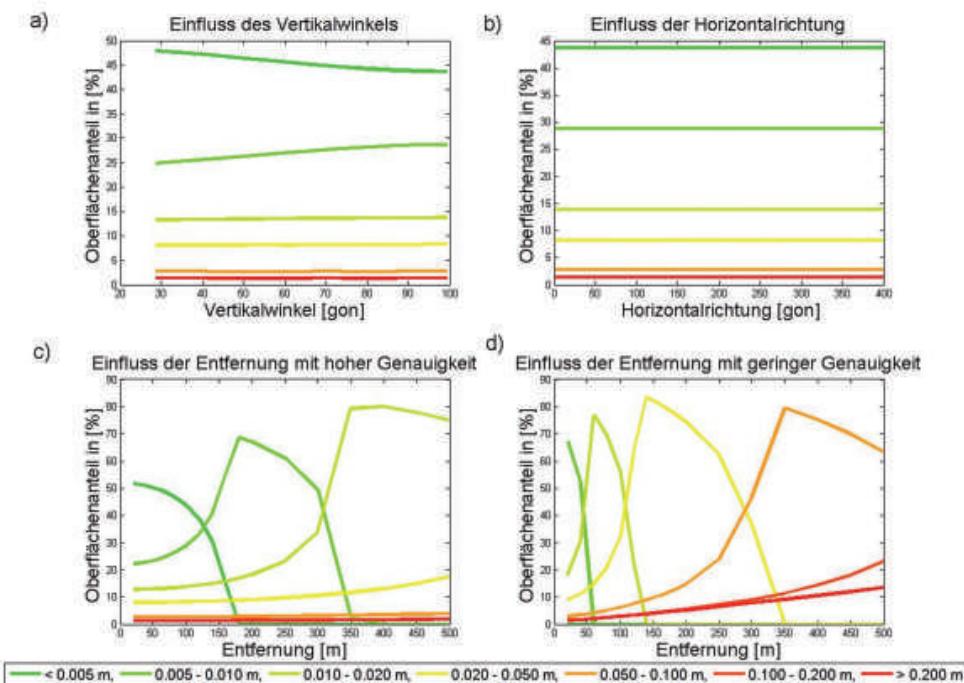


Abb. 8: Genauigkeitseinfluss der Aufnahmegeometrie.

von 40 m liegen Punktfehler zu ca. 51 % im Genauigkeitsbereich bis 1 cm. Bis zu dieser Entfernung wären diese Messgenauigkeiten durchaus vertretbar. Bei 120 m beträgt der Genauigkeitsbereich bis 2 cm nur noch 23 %. Bei 300 m sind 36 % der Kugeloberfläche im Genauigkeitsbereich zwischen 2 und 5 cm.

Die Berechnungen zeigen, dass für ausreichend gute Ergebnisse sehr genaue Messinstrumente verwendet werden müssen, wie sie in der Ingenieurgeodäsie bereits Anwendung finden. Eine Kamerakalibrierung unmittelbar vor dem Messeinsatz sollte die innere Orientierung der Kameras ausreichend gut bestimmen.

5 Ansatz mittels Mehrbild-Photogrammetrie (Stereo-Lösung)

5.1 Bestimmung der Markenposition am UAV mit Hilfe der Mehrbild-Photogrammetrie

Zusätzlich zu der bisher beschriebenen Systemkonfiguration sollen eine oder mehrere motorisierte Referenzkameras am Ende von gemessenen Basen zum Einsatz kommen (Abb. 9). Mit diesem Ansatz verbindet sich eine gewisse Redundanz, was ein größeres Maß an Zuverlässigkeit gewährleistet und das Tracking mit hoher Genauigkeit auch unter ungünstigen geometrischen Konfigurationen (schleifende Schnitte, gefährlicher Kreis) möglich macht.

In den weiteren Untersuchungen wird das Fehlerverhalten der Markenposition unter Einbeziehung eines zweiten Kamerastandpunktes (Stereofall) berechnet. Die Messanordnung sieht hierbei vor, dass von einem Standpunkt (ST1) mit einem motorisierten Videotachyme-

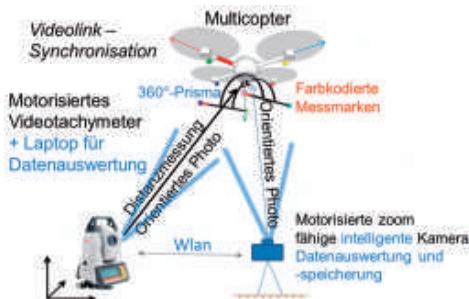


Abb. 9: Aktives Tracking mit Referenzkamera (Stereo-Lösung).

ter das UAV getrackt wird. Zeitgleich sollen über die Kamera am Tachymeter die Bildkoordinaten der Zielmarken am UAV bestimmt werden (analog also zum bisher behandelten Einbild-Fall). Zusätzlich wird nun eine Kamera auf einem zweiten Standpunkt (ST2), die über eine Pan-Tilt-Unit horizontal und vertikal schwenkbar ist, in einem bestimmten Abstand zum ersten Standpunkt so positioniert, dass sich ein annähernd gleichseitiges horizontales Dreieck zwischen ST1, ST2 und dem UAV aufspannt. Das Tachymeter misst die Position ST2 ein. Zudem sollte das UAV formatfüllend abgebildet werden, da dadurch die Marken besser detektiert werden können. Die Pan-Tilt-Unit sorgt in Verbindung mit der Kamera für die Zielerfassung des UAV, so dass der Reflektor am UAV immer im Bildkoordinatenursprung des Kamerabildes bleibt. Die Pan-Tilt-Units verfügen in der Regel über keine Winkelmesseinheiten. Lediglich anhand der Drehrate und der Schrittgenauigkeit der Servomotoren kann man grob die Winkelstellungen nachvollziehen. Jedoch können über die Kamerapositionen und die Position des UAV die äußeren Orientierungen der Kameras bestimmt werden, wenn das UAV abgebildet wird. Das Tachymeter wird bei dieser Messkonfiguration benötigt. Die Bildkoordinaten der Marken können vom Kamerastandpunkt aus in Horizontal- und Vertikalwinkel zwischen Reflektor und Marke (Ablagen) umgerechnet werden. Da die äußere Orientierung der Bilder auf der getrackten Position des UAV basieren, findet die Genauigkeitssteigerung nur bei der Bestimmung der Markenpositionen in Relation zueinander und zum Reflektor statt. Somit lassen sich die Drehwinkel

der äußeren Orientierung genauer ermitteln, die eigentliche UAV-Position jedoch nicht.

Da es sich bei den Ablagen um Horizontal- und Vertikalwinkel handelt, kann mit den Beobachtungen von ST1 und dem Vorwissen über die Distanz zwischen UAV-Reflektor und Marke eine 3D-Netzausgleichung unter Zwang berechnet werden. Die Koordinaten von ST1 und die X-Koordinate von ST2 bilden das fehlerfreie geodätische Datum. Als Beobachtungsgleichungen gehen die klassischen mathematischen Beziehungen zwischen den Standpunkt- bzw. Zielpunktkoordinaten und den Beobachtungsgrößen (Horizontalrichtung, Horizontalwinkel, Vertikalwinkel, Vertikalwinkeldifferenzen, Strecken) ein.

Die Netzausgleichungsberechnungen unter Zwang basieren für die nachfolgenden Beispielrechnungen auf dem vermittelnden (iterativen) Ansatz mit Näherungswerten. Alle Matrizen und Beobachtungsvektoren orientieren sich in ihrem Aufbau an einer festen Beobachtungsreihenfolge. Die Varianzen der Beobachtungstypen gehen in die Kovarianzmatrix (C_{II}) der Beobachtungen und den mittleren Gewichtseinheitsfehler $m_{0,APRIORI}$ als Gewichtsmatrix (P) ein (24).

$$P = \frac{1}{m_{0,APRIORI}^2} \cdot C_{II} \quad (24)$$

In der Funktionalmatrix A stehen in entsprechender Reihenfolge die partiellen Ableitungen der Beobachtungsgleichungen. Die Verbesserungen der Näherungswerte bzw. der Unbekannten berechnen sich nach (25) und (26).

$$\Delta l = l_{\text{gem}} - l_{\text{ger}} \quad (25)$$

$$\Delta x = (A^T P A)^{-1} \cdot A^T P \Delta l \quad (26)$$

5.2 Genauigkeitsberechnungen für die Markenpositionen mit Hilfe der Mehrbild-Photogrammetrie

Die Markenpositionen werden mit Hilfe der 3D-Netzausgleichung unter Zwang berechnet. Um Aussagen über die theoretische Genauigkeit der Unbekannten zu bekommen,

erfolgen Simulationen mit verschiedenen Beobachtungssätzen in Anlehnung an die Monte Carlo Methode. Hier werden die Beobachtungen variabel innerhalb ihres Genauigkeitsbereiches zufällig verfälscht, so dass plausible verfälschte Beobachtungssätze vorliegen. Mit den verfälschten Beobachtungssätzen wird jeweils eine 3D-Netzausgleichung unter Zwang berechnet. Die Koordinaten von ST1 und die X-Koordinate von ST2 bilden das fehlerfreie geodätische Datum. Die Simulation wird 10.000 mal wiederholt, da bei höherer Wiederholungsrate keine signifikanten Änderungen im Fehlerverhalten auftreten. Die berechneten Positionen des UAV, der Marke sowie die Y- und Z-Koordinate von ST2 werden gespeichert und 3-dimensional als Punktwolke verarbeitet. Hieraus können die Standardabweichungen, Mittelwert bzw. maximaler und minimaler Wert ermittelt werden.

5.3 Visuelle Gegenüberstellung der Einbild- und der Zweibild-Methode

Um einen Eindruck über die Genauigkeitssteigerung der Mehrbild-Methode zu bekommen, sollen hier exemplarisch die Genauigkeitsberechnungen der Einbild- und der Mehrbild-Methode visuell verglichen werden. Dazu wurden wieder rund um den UAV-Schwer-

punkt (Reflektor) im Abstand von 50 cm und im Intervall von einem Grad Abstand sowohl horizontal als auch vertikal Markenpunkte berechnet. Es ergeben sich eingefärbte Kugeloberflächen. Die Bedingungen des Einbild-Falls wurden für den Mehrbild-Fall lediglich um einen zweiten Kamerastandpunkt erweitert. Die Beobachtungsfehler sind identisch. Konkrete Werte sollen hier nachgeordnet sein und werden sicherlich für verschiedene Szenarien auch unterschiedliche Ergebnisse produzieren.

Abb. 10a zeigt das Genauigkeitsverhalten für den Einbild-Fall über das Varianzfortpflanzungsgesetz mit typischem Ringmuster. Abb. 10b zeigt hingegen die Ergebnisse der simulierten 3D-Netzausgleichung für den Zweibild-Fall. Für jeden einzelnen Oberflächenpunkt wurden 10.000 Beobachtungssätze simuliert und über den iterativen Ausgleichungsansatz mit Näherungswerten berechnet. Bei genauerer Betrachtung kann man auch noch einen Ring ganz schwach gelb durchschimmern sehen. Die Punktgenauigkeiten schwanken beim Zweibild-Fall jedoch kaum und liegen für diesen Fall bei einer Grenze von 1 cm. Man erkennt gut, dass eine Genauigkeitssteigerung stattgefunden hat, da in Abb. 10a noch Ringmuster bis zur Farbe Rot vorhanden sind, die in Abb. 10b deutlich abgemildert wurden.

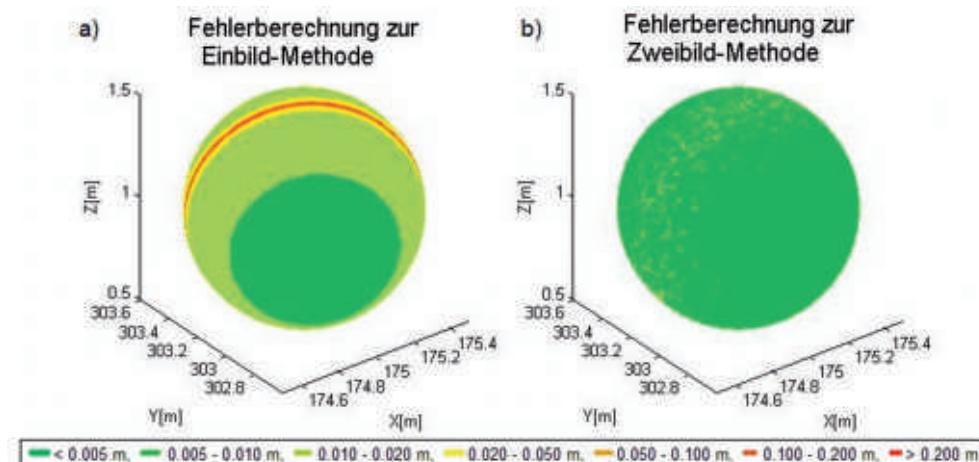


Abb. 10: Gegenüberstellung Einbild- und Zweibild-Methode.

6 Zur Bestimmung der äußeren Orientierung

6.1 Bestimmung der Parameter der äußeren Orientierung mit Hilfe der Markenpositionen

Mindestens 3 Marken am UAV sollten im UAV-eigenen und im übergeordneten Koordinatensystem bekannt sein, um die 6 3D-Transformationsparameter zwischen den beiden Systemen zu bestimmen (LUHMANN 2009). Die Methode der kleinsten Quadrate berechnet hierbei die besten Schätzwerte für die unbekannten Parameter. Als funktionales Modell eignet sich eine 6 –Parametertransformation. Das UAV-eigene Koordinatensystem bildet das Startsystem und das übergeordnete Koordinatensystem das Zielsystem ab. Nach NIEMEIER (2002) werden die Koordinaten im Zielsystem als "Beobachtungen" aufgefasst. Die Koordinaten der Passpunkte im Ausgangssystem bilden die Stützstellen zur Bestimmung der Transformationsparameter, d.h. sie gehen in die Koeffizientenmatrix A ein. Die Elemente der Drehmatrix, r_{ij} , sind Funktionen der unbekannten Rotationsparameter, deren Formulierung von der Drehreihenfolge abhängt.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{Zielsystem}} = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{\text{Startsystem}} \quad (27)$$

Die Ausgleichung basiert hier auf dem vermittelnden, iterativen Ansatz mit Näherungswerten. Eine feste Beobachtungsreihenfolge ist für den Aufbau aller Matrizen und Vektoren maßgeblich. Der Rechenweg ist (24) bis (26) nachempfunden.

6.2 Genauigkeitsbetrachtung für die Parameter der äußeren Orientierung

Sind die Markenpositionen und deren Genauigkeiten im übergeordneten und UAV-eigenen Koordinatensystem bekannt, kann hier eine Genauigkeitsberechnung über mehrere simu-

lierte Ausgleichsrechnungen nach dem Vorbild der Monte Carlo Methode vorgenommen werden. Auch hier gilt, dass jeder Beobachtungssatz seinen eigenen empirischen Fehler erzeugt und nur über eine Reihe von Simulationen mit innerhalb der Genauigkeitsangaben modifizierten Beobachtungen Rückschlüsse auf das theoretische Fehlerverhalten gezogen werden kann. Dazu werden die Koordinaten der Marken sowohl im übergeordneten als auch im UAV-eigenen Koordinatensystem innerhalb der vorher berechneten Genauigkeiten mit einem Gauß-basierten Zufallsgenerator verfälscht und eine Ausgleichung berechnet. Alle ausgeglichenen Transformationsparameter werden gespeichert. Hieraus können Standardabweichungen, Mittelwert bzw. maximaler und minimaler Wert ermittelt werden.

6.3 Ergebnisse für die Genauigkeiten der Parameter der äußeren Orientierung

Da noch nicht bekannt ist, wie viele Marken am UAV wo und wie befestigt werden, wurde ein Testkoordinatensatz künstlich erzeugt. Dabei wurde ein Würfel mit der Kantenlänge von einem Meter definiert. Als Markenpositionen wurden die 8 Ecken und die 12 kantenhalbierenden Punkte benutzt. Dieser Würfel bildet in sich ein Koordinatensystem ab und ist mit dem UAV-Koordinatensystem vergleichbar. Da mehr Passpunkte vorliegen als nötig, wurden die Transformationsparameter über die vermittelnde Ausgleichung nach dem Modell aus (27) mit der Drehreihenfolge RpRoRk bestimmt. Um Genauigkeiten der Transformationsparameter zu bestimmen, wurden die Koordinaten des Zielsystems künstlich zufällig verfälscht und die Ausgleichung 10.000 mal wiederholt. Nach 10.000 Wiederholungen sind auch hier keine signifikanten Änderungen im Fehlerverhalten aufgetreten. Die einzelnen Transformationsparameter wurden gespeichert und ihr Verhalten zueinander analysiert. Einen Überblick über die Ergebnisse unterschiedlicher Transformationsvoraussetzungen geben die folgenden Tabn. 2 und 3.

In Tab. 2 wurden 10 und in Tab. 3 je 20 Marken für die Berechnungen der Genauigkeiten der Transformationsparameter herangezogen

und unter unterschiedlichen Koordinatengenauigkeiten des Zielsystems berechnet. Da es sich um Messmarken aus einem sehr leichten Material handelt, hängt die Anzahl der Marken lediglich von der Größe und Flugstabilität des UAV ab. Für z. B. die MD4-1000 wäre es kein Problem, 20 oder mehr Marken an Bord zu befestigen. In Abb. 2 sind bereits 8 Marken an einer MD4-1000 dargestellt. Bei 10 Marken und einer Positionsgenauigkeit der Marken von 5 mm können die Winkel auf ca. 0.16° genau bestimmt werden. Bei 20 Marken steigt die Winkelgenauigkeit auf ca. 0.11°. Aus 50 m Höhe würde das einen Versatz von ca. 10 cm am Boden bedeuten. Benutzt man Genauigkeiten für die Markenpositionen von 1 cm entstehen bei 10 Marken Winkelgenauigkeiten zwischen 0.29° bis 0.33° und bei 20

Tab. 2: Erreichbare Genauigkeiten mit 10 Marken.

Positionsfehler (m)	Rotationsparameter (°)		
	σ_ω	σ_φ	σ_κ
0.005	0.15	0.15	0.16
0.010	0.30	0.29	0.33
0.015	0.45	0.44	0.49
0.020	0.61	0.57	0.66
0.025	0.74	0.71	0.82
0.030	0.91	0.87	0.98
0.035	1.06	1.00	1.14
0.040	1.21	1.14	1.29

Tab. 3: Erreichbare Genauigkeiten mit 20 Marken.

Positionsfehler (m)	Rotationsparameter (°)		
	σ_ω	σ_φ	σ_κ
0.005	0.11	0.10	0.11
0.010	0.22	0.20	0.23
0.015	0.34	0.31	0.33
0.020	0.44	0.40	0.44
0.025	0.55	0.51	0.56
0.030	0.68	0.61	0.68
0.035	0.80	0.70	0.80
0.040	0.89	0.80	0.89

Marken Winkelgenauigkeiten zwischen 0.20° bis 0.23°. Hier wäre ein Versatz am Boden aus 50 m Höhe von ca. 20 cm vorhanden.

7 Fazit

Eine Bestimmung der Position und Orientierung eines UAV durch ein terrestrisches System bestehend aus einem zielfolgenden Videotachymeter, einem Reflektor und zusätzlichen Markierungen (kugelförmige, verschiedenfarbige Zielmarken) am UAV ist möglich, wobei im Beitrag zwei Varianten diskutiert und mathematisch beschrieben werden – die Einbild-Lösung und die Stereolösung. Mittels Varianzfortpflanzungsgesetz und Netzausgleichung werden Genauigkeitsabschätzungen für diese Varianten berechnet. Die Ergebnisse der Genauigkeitsberechnungen sowohl der Reflektor- als auch der Markenpositionen zeigen deutlich die Abhängigkeit von verschiedenen Einflussgrößen. Für die Berechnungen wurden lediglich die Beobachtungen (und Genauigkeiten) des Tachymetersystems, die Bildkoordinaten sowie die Kamerakonstante berücksichtigt. Zudem wurden Restriktionen eingeführt, die das mathematische Modell vereinfachen. Somit werden theoretische Werte für die Genauigkeiten berechnet, die auch eine Art oberste Genauigkeitsgrenze darstellen, da in der Realität weitere Fehlereinflüsse hinzu zu addieren sind, wie z. B. Refraktion, Bewegungsunschärfe, Eigendynamik und Leistungsgrenzen des Beobachtungssystems.

Dass solche Konstellationen durchaus interessant sind, zeigen die Entwicklungen der Gerätehersteller hin zum Videotachymeter in den letzten zwei Jahren. Ursprünglich zur Baudokumentation eingegebauten Kameras in Tachymetern erfüllen heute sogar Messaufgaben. Hinzu kommen immer höhere Auflösungen und Videofunktionen dieser Kameras. Für Standbilder werden bereits die äußeren Orientierungsparameter mit aufgezeichnet. Zukünftig könnten Videotachymeter die äußeren Orientierungen der einzelnen Videobilder in Form von Zeitreihen geräteintern speichern. Derzeit sind die Videotachymeter jedoch noch nicht in der Lage, ein UAV in der Art und Weise, wie in diesem Beitrag be-

schrieben, zu positionieren. Man könnte zwar einzelne Bilder vom UAV erstellen, jedoch müssten diese Bilder des UAV synchron zur Aktion am UAV ausgelöst werden, was noch nicht funktioniert.

Auch wenn diese Methode der Bestimmung der äußereren Orientierung eines UAV auf den ersten Blick recht aufwendig erscheint, bietet dieses Verfahren die Möglichkeit, genauere Angaben der äußereren Orientierungsparameter zu bekommen. Zudem wird die Messung nicht an Bord des UAV durchgeführt, sondern terrestrisch, was zusätzliche Nutzlast an Bord des UAV schafft. Daher stellt eine Umsetzung der hier vorgestellten Ideen für praktische Anwendungen einen durchaus lohnenswerten Ansatz dar. Dies gilt einerseits besonders für Anwendungsfälle, in denen

- 1) ein UAV nicht mit zusätzlicher Sensorik und damit Gewicht ausgestattet werden soll und in denen
- 2) geodätisch-photogrammetrisches Equipment wie z. B. Videotachymeter und Kamera sowieso vorhanden ist, z. B. für Baustellenüberwachung.

Diese Verfahren würden sich zudem sehr gut dazu eignen, UAV-eigene Lagesensoren zu kontrollieren und zu kalibrieren. Aber auch eine Berechnung der äußereren Orientierungsparameter, die zusätzlich die an Bord befindlichen Sensordaten berücksichtigt, wäre denkbar.

Danksagung

Dem Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus Mecklenburg-Vorpommern sei für die Förderung des Projektes PFIFFIKUS gedankt, in dem diese Ergebnisse entstanden. Weiterhin sei den Reviewern für die zahlreichen und wichtigen Hinweise gedankt.

Referenzen

DOLD, J., 2004: Neue Laser-Technologien für die Industrievermessung. – PFG 2004 (1): 39–46.

- EISENBEISS, H., STEMPFHUBER, W. & KOLB, M., 2009: Genauigkeitsanalyse der 3D-Trajektorie von Mini-UAVs. – Tagungsband der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung (DGPF) 18.
- GRENZDÖRFFER, G. & BILL, R., 2010: Unmanned Airborne Systems (UAS) – moderne und flexible Geodatenerfassung. – HARZER, B. (Hrsg., 2010): GIS-Report Software – Daten – Firmen 2010/11: 17–26, Bernhard Harzer Verlag.
- HENNES, E.R.E., 2008: A-TOM – eine neuartige instrumentelle Lösung für die hochpräzise und echtzeitnahe 6DOF-Bestimmung. – AVN 8–9/2008: 301–310.
- JURETZKO, M., 2005: Reflektorlose Video-Tachymetrie – ein integrales Verfahren zur Erfassung geometrischer und visueller Informationen. – Dissertation, Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften in Kommission beim Verlag C. H. Beck, München.
- KIRSCHNER, H. & STEMPFHUBER, W., 2008: The Kinematic Potential of Modern Tracking Total Stations. – A State of the Art Report on the Leica TPS1200+. – STEMPFHUBER, W. & INGENSAND, H. (eds.), MCG-Proceedings: 51–60.
- LEICA, 2011: Leica VIVA 15 Datenblatt. – http://www.leica-geosystems.com/downloads123/zz/tps/Viva%20TS15/brochures-datasheet/Leica%20Viva%20TS15%20Datasheet_de.pdf (9.12.2011).
- LUFTVO, 2010: Luftverkehrs-Ordnung (LuftVO). – <http://www.gesetze-im-internet.de/luftvo/BJNR006520963.html> (11.1.2011).
- LUHMANN, T., ROBSON, S. & KYLE, S., 2006: Close-range photogrammetry. – 510, Whittles, Dunbeath.
- LUHMANN, T., 2009: Precision potential of photogrammetric 6DOF pose estimation with a single camera. – ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 64 (3): 275–284.
- NIEMEIER, W., 2002: Ausgleichsrechnung. – Eine Einführung für Studierende und Praktiker des Vermessungs- und Geoinformationswesens. – Walter de Gruyter, Berlin.
- RESNIK, B. & BILL, R., 2009: Vermessungskunde für den Planungs-, Bau- und Umweltbereich. – 3. Auflage. Wichmann, Offenbach.
- TRIMBLE, 2011: Trimble S8 datasheet. – http://tr1.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-390413/022543-410F-D_TrimbleS8_DS_1011_sec.pdf (9.12.2011).
- WASMEIER, P., 2009: Grundlagen der Deformationsbestimmung mit Messdaten bildgebender Tachymeter. – 149, DGK Reihe C, Heft Nr. 638, München.

Anschrift des Autors:

Dipl.-Ing. F. NIEMEYER, Prof. Dr.-Ing. R. BILL, Dr.-
Ing. G. GRENZDÖRFFER, Universität Rostock, Profes-
sur für Geodäsie und Geoinformatik, Justus-von-
Liebig-Weg 6, 18056 Rostock, Tel. +49-381-498-
3200, Fax +49-381-498-3202, {frank.niemeyer}
{ralf.bill}{goerres.grenzdoerffer}@uni-rostock.de

Manuskript eingereicht: Juli 2011

Angenommen: Januar 2012



Low-cost optical Camera Systems for real-time Mapping Applications

FRANZ KURZ, SEBASTIAN TÜRMER, OLIVER MEYNBERG, DOMINIK ROSENBAUM, HARTMUT RUNGE, PETER REINARTZ, Oberpfaffenhofen & JENS LEITLOFF, Karlsruhe

Keywords: Direct georeferencing, GPS/inertial systems, real-time processing, camera calibration

Summary: Real-time monitoring of natural disasters, mass events, and large accidents with airborne optical sensors is an ongoing topic in research and development. The performance of experimental airborne low-cost camera systems for real-time mapping applications is exemplarily evaluated in terms of geometrical accuracy, radiometric performance, and processing times. Focus lies on the analysis of the geometrical stability of low-cost camera systems within several years of operation and on the evaluation of the limits of direct georeferencing. Further a real-time processing chain including a real-time GPU (graphical processing unit) based orthorectification method is proposed taking into account the maximum possible frame rates of the cameras of five frames per second.

Zusammenfassung: *Preisgünstige Kamerasysteme für Echtzeitanwendungen.* Die Beobachtung von Naturkatastrophen, Großereignissen und Unfällen mit flugzeuggestützten optischen Sensoren in Echtzeit ist ein derzeit wichtiges Thema in Forschung und Entwicklung. In diesem Zusammenhang wird die Leistungsfähigkeit von preisgünstigen Kamerasystemen für Echtzeitanwendungen in Hinblick auf geometrische Genauigkeit, radiometrische Eigenschaften und Prozessierungszeiten evaluiert. Der Schwerpunkt liegt bei der Analyse der geometrischen Stabilität von preisgünstigen Kameras im langjährigen Betrieb und den Grenzen der direkten Georeferenzierung. Weiterhin wird eine echtzeitfähige Prozessierungskette mit einer GPU (graphical processing unit) basierten Orthorektifizierungsmethode für eine maximal mögliche Aufnahmerate von 5 Hz vorgestellt.

1 Introduction

Compared to using optical satellite data, airborne monitoring of natural disasters, mass events, and large accidents has the advantage of flexible data acquisition and higher spatial resolution. With the rise of new airborne platforms, there is an increasing demand for low-cost, low-weight and small optical camera systems. These aspects become even more important as the payload of these flying platforms is limited and end users such as police and rescue forces want to equip their proprietary flight squadrons at limited costs. Compared to high-end photogrammetric systems, 36 mm format cameras are very cheap and offer new applications due to their higher frame rate, smaller size and weight. Nevertheless,

the geometrical accuracy and radiometric performance compared to reference photogrammetric systems will also be decisive for the acceptance of low-cost cameras. Different small low-cost camera systems are in use for gyrocopters, helicopter, UAVs (Unmanned Aerial Vehicles), and airships (HAARBRINK & KOERS 2006, ZONGJIAN 2008, NAGAI et al. 2009, LEHMANN et al. 2011). The range of camera types goes from small industrial cameras (ERNST et al. 2003) via middle format cameras (SCHARDT et al. 2010) to large format cameras (PETRIE 2003, CRAMER 2010). Real-time processing of airborne optical camera images in combination with high frame rates paves the way for innovative applications. It is possible to monitor highly dynamic processes like traffic (ROSENBAUM et al. 2008, LEITLOFF et al. 2010)

or persons (SIRMACEK & REINARTZ 2011). Airborne video camera systems are also used for person and traffic monitoring e.g. in SHAstry & SCHOWENGERDT (2005). DSMs (Digital Surface Models) generated in real-time (ZHU et al. 2010) and real-time orthophoto maps are a valuable data source in different scenarios. A real-time monitoring system based on airborne video cameras which includes the whole processing chain from the airplane to the ground was designed in SCHARDT et al. (2010) and SRINIVASAN & LATCHMAN (2004).

The general requirements for the development of optical camera systems at DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt) were to acquire images with high resolution and wide FOV (field of view) in real-time. Besides, the products like ortho mosaics and traffic parameters should be generated with sufficient geometric accuracy; 3 m absolute horizontal position accuracy are assumed as sufficient in particular for the import into GIS or road databases. For real-time monitoring of highly dynamic processes, the overall processing should avoid data pile-ups and the time between acquisition and delivery should not exceed five minutes. Finally, the sensor systems including the real-time processing chain should be cheap, small and light-weighted enough to be flexibly mountable on airplanes, gliders, and UAVs.

The consideration of all requirements resulted in the sensor and hardware architecture described in this paper. The proposed architecture is exemplarily evaluated based on already existing sensor systems and the experience made in five years of experimental application is presented. The focus lies on the geometrical and radiometric performance of the real-time processing chain, which includes image processors on board, data downlink to the ground station, and further processing and distribution on the ground. Section 2 presents the flight, camera and viewing configuration as well as the software and hardware architecture required for real-time processing. To fulfill the low-cost requirement, the proposed system architecture consists of three 36 mm cameras which are cheap compared to photogrammetric systems. The other components are also relatively cheap, except for the GPS/IMU (inertial measurement unit) from IGI

(IGI 2011). Thus, efforts are made to replace the IMU by a software solution e.g. by optical navigation (KOZEMPEL & REULKE 2009), but in the proposed processing chain the GPS/IMU remains included to allow real-time processing. Moreover, the real-time requirement is not easy to realize, as the number of airborne processing units is restricted. On the other hand, full processing at the ground station in real-time is also impossible due to the limited downlink capacity. Thus, new processors with high parallelization or GPU (graphical processing unit) implementations are designed as described in section 2.4 for the orthorectification process. In section 3, the geometrical properties of the sensor systems are evaluated, which is followed by a comprehensive performance evaluation in section 4.

2 The Sensor Hardware and Processing Chain

2.1 The Cameras

There are three low-cost real-time optical sensor units operated at DLR, the 3K and 3K+ camera system licensed for the DLR airplanes Cessna and Do228 as well as a sensor unit called CHICAGO integrated in a motorized DLR glider powered by a hydrogen-oxygen fuel cell (COPPINGER 2010). The important components are the cameras, which are described in more detail in this chapter.

Each system consists of three non-metric Canon cameras. For the 3K system the Canon EOS 1Ds Mark II camera with Canon lenses is used, whereas the successor model 3K+/CHICAGO uses the CANON EOS 1Ds Mark III camera with Zeiss lenses. The nominal focal length for 3K/3K+ is 50 mm and for the CHICAGO system 35 mm in the side-look and 50 mm in forward / backward direction. The 3K and 3K+ systems are mounted on a ZEISS aerial shock mount ready for the DLR airplanes. The main differences between 3K and 3K+/CHICAGO are the cameras and lenses, the rest of the hardware and software components remain the same. The properties of the sensors of the 3K and 3K+/CHICAGO systems are listed in Tab. 1.

Tab. 1: Properties of 3K and 3K+/CHICAGO camera system.

	3K	3K+/CHICAGO
Cameras	3 × EOS 1Ds Mark II	3 × EOS 1Ds Mark III
Sensor / Pixel size	Full frame CMOS / 7.21 µm	Full frame CMOS / 6.41 µm
Image size	3 × 4992 × 3328 (16.7 MPix)	3 × 5616 × 3744 (21.0 MPix)
Max. frame rate (Max. images)	3 Hz (~50 images)	5 Hz (63 images)
File size	20 MByte (RAW) 5.5 MByte (JPEG level 8)	25 MByte (RAW) 6.5 MByte (JPEG level 8)
ISO	100 – 1600	50 – 3200
Aperture	1.4 – 22	1.4 – 22
Lenses	Canon EF 1.4 50 mm	Zeiss Makro-Planar 2/50 mm Zeiss Distagon T* 2/35 mm
Data rate (1 cam, JPEG level 8) at 0.5 Hz	8.3 MByte/s	9.8 MByte/s
Interface	Firewire IEEE 1394a	USB 2.0

The Mark III camera delivers 21.0 MPix compared to 16.7 MPix of the Mark II camera. Thus, the GSD (ground sample distance) of an image taken from 1000 m above ground in nadir direction is 15 cm and 13 cm for the 3K and the 3K+ systems, respectively. The Mark III camera also outperforms the Mark II by a higher frame rate and the maximum number of images, which is important for photogrammetric applications where high overlaps are necessary. The camera offers 5 Hz maximum frame rate resulting e.g. in 97 % overlap at 1000 m above ground at a typical flying speed of 140 knots. According to the specification, the Mark III takes up to 63 images with 5 Hz. The number of images is limited by an overflow of the internal memory, which depends on the data rate produced by the cameras. The listed data rates of 8.3 and 9.8 MByte/s, respectively, at 0.5 Hz can be used for unlimited continuous acquisition. Therefore, different acquisition modes are required depending on the application.

The different acquisition modes are illustrated in Fig. 1. In principle, the cameras of the 3K and 3K+ systems are arranged to provide one nadir view and two oblique views. The oblique viewing angle is configurable freely with a maximum of 32°. The camera system can be installed across track or along track, which results in a wide FOV of up to 104° across or along track, respectively (see Tab. 2).

Typical applications for along-track acquisition are the monitoring of roads and places up to one minute since certain target areas remain longer in the FOV. For applications which require higher frame rates, e.g. traffic monitoring, the camera systems are in a recording mode that is called “burst mode”. In this mode, the cameras take a series of e.g. three exposures with a frame rate of up to 5 Hz, and then it pauses for several seconds. During this pause, the plane moves significantly over ground. Then, with an overlap of about 10 % to 20 % to the first exposure “burst”, the second exposure sequence is started. By this periodical shift between exposure sequences and brakes, we are able to perform an area-wide traffic monitoring while avoiding data overflow in the cameras. In the continuous mode, the frame rate is lower but with constant overlap, e.g. for 3D applications.

The CHICAGO system has a different configuration of the three cameras, providing two acquisition modes, the along-track continuous mode and the circling mode. In the first mode, the glider follows a certain route which is monitored by the forward and backward cameras. The side-looking camera is used for the circling mode, where the glider is circling around a fixed position, thus, allowing a continuous monitoring of a static position on ground.

Typical flying heights of the camera systems are in the range of 500 m to 3000 m above ground, which leads to a GSD between 6.5 cm and 45 cm. In Tab. 2, all relevant properties of the viewing configurations are listed based on 35 mm lenses for the CHICAGO circling mode and 50 mm lenses for all other modes. The viewing directions of the 3K/3K+ side-looking cameras are variable up to 32°. The FOV at the maximum angle is 2×52°

across track and 2×13° in the other direction. For the CHICAGO system, the camera viewing angles are fixed. The coverage is defined as the largest possible rectangle in the orthorectified images from all three cameras assuming a horizontal airplane orientation. This assumption is not valid for the CHICAGO circling modus, as the glider rolls with a roll angle up to 30° in the direction of the side-looking camera.

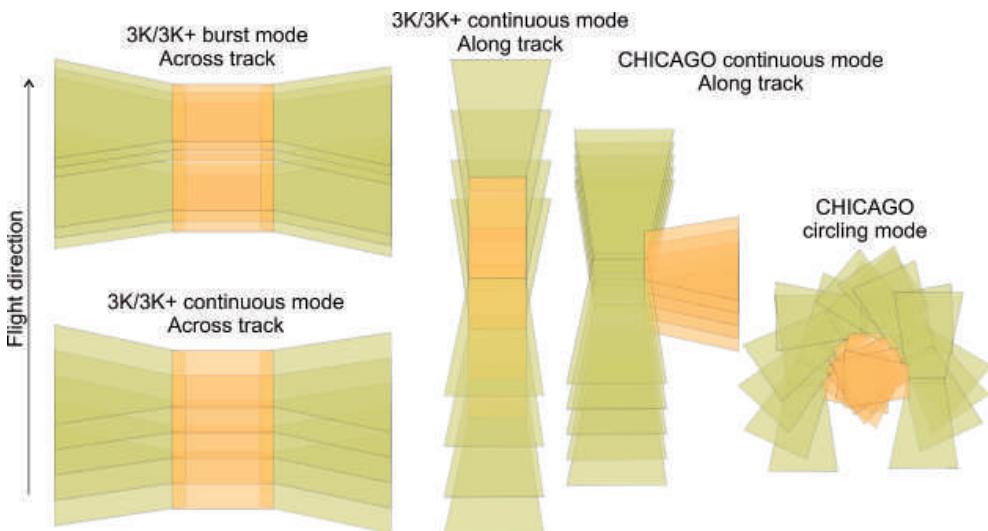


Fig. 1: Acquisition modes of 3K, 3K+ and CHICAGO system. Orange: Nadir camera (3K/3K+) / side-looking camera (CHICAGO). Green: side-looking cameras (3K/3K+) / forward and backward camera (CHICAGO).

Tab. 2: Properties of the different viewing configurations.

	3K	3K+	CHICAGO Forward-Backward	CHICAGO Circling (assuming +20° roll angle)
Viewing directions	1× nadir, 2× ±32° /variable	1× nadir, 2× ±32° / variable	2× ±13° along track	1× 11° right look (31° install. angle)
FOV	±52° across, ±13° along	±52° across, ±13° along	±20° across (50 mm lenses) ±27° along (50 mm lenses)	-8° to +30° right look (35 mm lenses) ±27° along (35 mm lenses)
Coverage / GSD @ 500m	1280 m × 240 m / 7.5 cm nadir	1280 m × 240 m / 6.5 cm nadir	363 m × 509 m / 6.5 cm nadir	358 m × 519 m 9.2 cm
Coverage / GSD @ 1000m	2560 m × 480 m / 15 cm nadir	2560 m × 480 m / 13 cm nadir	726 m × 1018 m / 13 cm nadir	716 m × 1038 m 18.4 cm
Coverage / GSD @ 3000m	7680 m × 1440 m / 45 cm nadir	7680 m × 1440 m / 39 cm nadir	2178 m × 3054m / 39 cm nadir	2148 m × 3114 m 54.9 cm

2.2 The real-time Processing Chain: Hardware

For the real-time processing and the distribution of airborne images, an on-board processing chain including data transfer from the airplane to the ground is currently under development. The on-board system consists of the optical sensors, the GPS/IMU, the processing units, and a C-band microwave data link

with a downlink capacity of up to 54 MBit/s depending on the distance and bandwidth (Fig. 2). Upon receiving the pre-processed data from the airplane, the mobile ground station processes the data and provides them to the end users via web-based portals (KURZ et al. 2011).

Tab. 3 lists the sizes and weights of all necessary hardware components as they are installed in the DLR glider. Further improve-



Fig. 2: 3K+/CHICAGO airborne and ground based hardware components.

Tab. 3: Size and weight of CHICAGO airborne hardware components.

Nr	Component	Size (mm)	Weight (kg)
2×	Microwave antenna SRS (SRS 2011)	120×120×113	2×0.75
1×	Network radio SRS	58×120×230	1.00
2×	Amplifier SRS	78×108×220	2×1.60
3×	Canon EOS 1Ds cameras	156×159×80	3×1.21
3×	Zeiss lenses	ø72 length 65	3×0.53
1×	GPS Antenna		0.20
1×	IMU (IGI Aerocontrol IId)	200×132×137	2.10
1×	GPS/IMU processor (IGI)	65×140×205	1.80
1×	PC unit	360×240×30	2.5
1×	System mount + cables + screws etc.		9.8
			Σ 27.32

ments with respect to weight, volume, and price could be achieved by substituting the IMU with a smaller but less accurate version or by an optical navigation software solution.

2.3 The real-time Processing Chain: Software Architecture

The real-time image processing chain onboard the airplane is illustrated in Fig. 3. Each of the cameras is connected via FireWire (3K) or USB (3K+) to a PC on which a Canon soft-

ware interface (EDSDK) and the orthorectification process run. The external flash output of the camera triggers the GPS/IMU. Every time a flash signal is received by the GPS/IMU it creates a hardware event and sends the exterior orientation parameters at the time of this event to the camera PC via a TCP connection. The camera control module runs a TCP client and assigns the received exterior orientation data to the image just downloaded by the camera. Using a DEM (digital elevation model), e.g. from the Shuttle Radar Topographic Mission in 2000 (SRTM), together

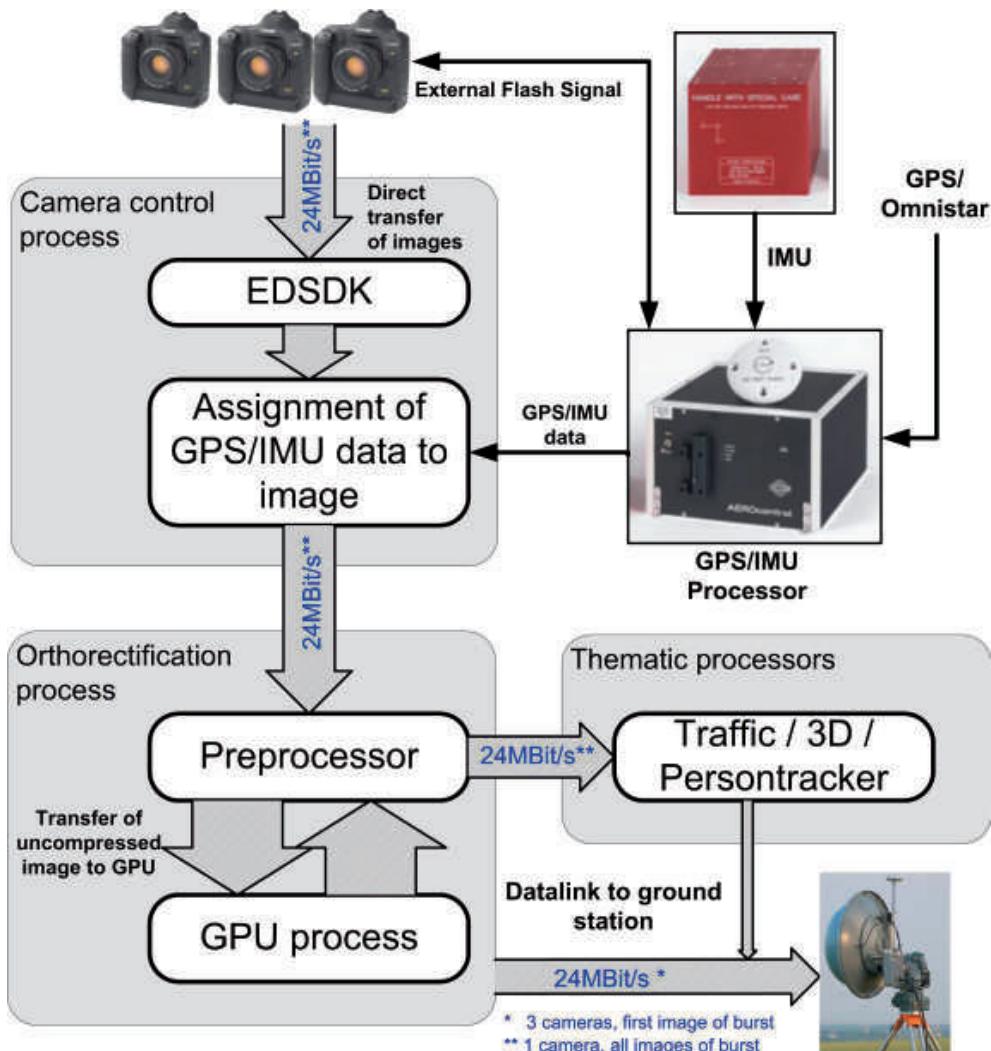


Fig. 3: On-board image processing system.

with the calibration and orientation parameters, each image will be orthoprojected on the GPU (section 3.4). Further thematic processors, like automatic traffic processors, person trackers, or 3D processors, are attached to the processing chain. Assuming the 3K+ burst mode (section 3.1) as the standard configuration, the data rate at the cameras is about 24 Mbit/s, which results from taking three pictures with a file size of 9 MB in two seconds and then pausing for another seven seconds. The data streams of the three cameras are unified at the datalink. To avoid data pile-ups and to fulfill the real-time requirement, the orthorectification process, the thematic processors, and the datalink should be ready for data rates of 24 Mbit/s.

2.4 GPU-enabled Orthorectification

The orthorectification needs to meet the required timing constraints of 24 Mbit/s. As each pixel can be orthorectified independently, the orthorectification is well-suited for GPU architectures. Our implementation runs

on CUDA-enabled (Compute Unified Device Architecture) GPUs which hold a large number of so-called *thread processors*. The basic idea is that each thread processor calculates the geo- and colour information for a single pixel of the orthoimage in one *thread*. This calculation runs in 768 threads simultaneously resulting in a large speedup compared to a CPU-only implementation. The threads are executed on the physically separated GPU, which operates as a coprocessor to the host's CPU where the rest of the program runs. This is done by well documented CUDA extensions to the C language. The main programming challenge is the correct usage of the different kinds of processing units on the GPU and the different kinds of memory areas to maximize the performance gain (NVIDIA 2011).

As illustrated in Fig. 4, the host does all preparatory steps for the direct georeferencing such as calculating the ground-to-image rotation matrix or creating a bounding box for the output image (step 1 in Fig. 4). This information only needs to be calculated once for each image, so there would not be a considerable speed-up if the GPU performed these steps.

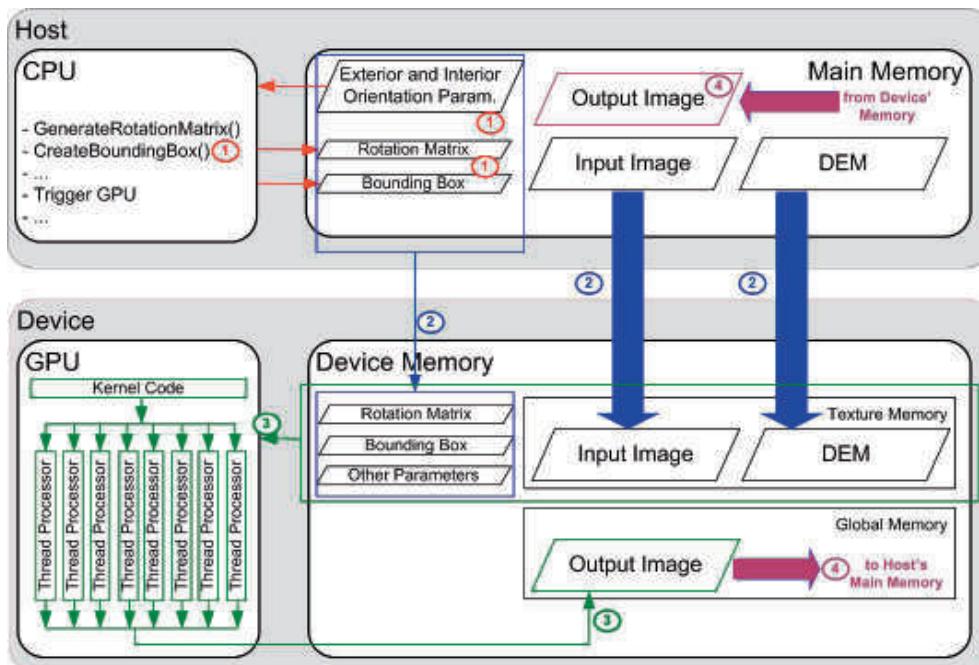


Fig. 4: Instruction throughput and memory utilization of the orthorectification process. The encircled numbers refer to the processing steps described in the text.

Step 2) in Fig. 4 loads the input image and the DEM of this region into the host memory and from there into the texture memory which is part of the device memory. The texture memory is a special memory area; it is cached and supports 2D memory layouts, 2D indexing, and automatic resampling. All of these features suit perfectly well for image data. The memory is read-only, though, so we cannot use it for storing the output image. As a side note, newer architectures do support writeable texture memory, which is called surface memory.

After loading the rotation matrix and camera parameters to the cached constant memory, the kernel function is called. This means that all available thread processors on the GPU start to execute at the same time (step 3 in Fig. 4). Each thread processor runs the same kernel with the same algorithm in parallel and calculates the UTM coordinates for one pixel in the output image. The processing is separated in blocks which consist of a constant number of threads, so every block of threads calculates one particular region. In combination with a structured block index the image coordinates in the whole output image are uniquely determined, so that we can now focus on the processing steps within the kernel.

Basically, the orthorectification kernel implements the collinearity equations in direction from object to image space. Starting from the object space the pixel position in the input image is calculated based on the interior

and exterior orientation parameters of the image. In image space, we use a self-written bilinear interpolation function for determining the output colour vectors because CUDA only supports automatic resampling if the pixels are stored as 32-bit floats, which would waste too much memory in our case. Step 4 in Fig. 4 transfers the complete orthorectified output image back to host memory. Due to the slow PCI bus this step takes as much time as all preceding steps but cannot be avoided.

3 Sensor Calibration

In this section, the geometric properties of the 3K/3K+/CHICAGO camera systems are evaluated. For this purpose, the interior camera parameters are determined by in-flight calibration. For the 3K camera system, the interior camera parameters were repeatedly evaluated in the last years. The results showed that the overall accuracy of these low-cost non-metric cameras is significantly lower than for standard photogrammetric cameras (KURZ 2009). The reasons are thermal effects, non-flatness of the image plane, aberrations, as well as defocusing problems. The latter problem occurred because the lenses were not adjusted to the camera gauges, i.e. points in the infinity were not imaged in the focal plane correctly. The next generation camera systems 3K+ and CHICAGO have been improved by using more appropriate lenses (Zeiss Makro Planar) with

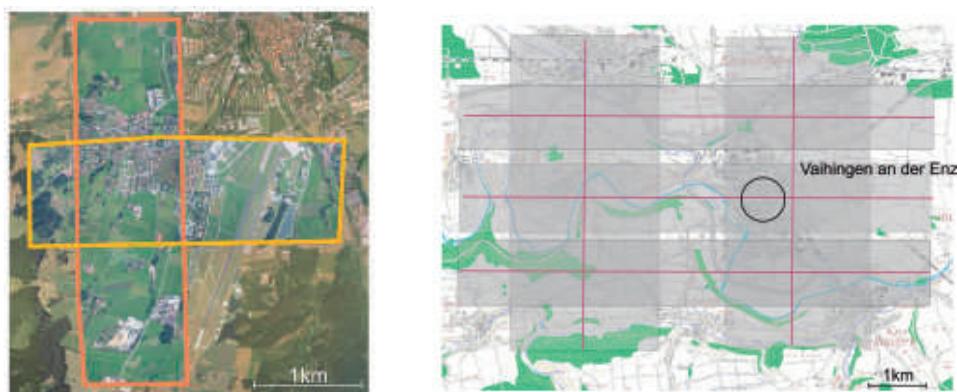


Fig. 5: Left: Calibration site in Kaufbeuren on 21st September 2010 with 40 ground control points. Flying height was 1350 m above ground. Right: Calibration site in Vaihingen on 15th July 2008 with 200 ground control points. Flying heights were 1350 m and 2600 m above ground, respectively.

lower distortions and by adjusting the lenses to the camera gauges.

For the calibration of the 3K and 3K+ systems, calibration flights were performed in 2008 and 2010 at the calibration sites in Vaihingen and Kaufbeuren (Fig. 5). The goal of the calibration is to estimate the interior orientation parameters, to validate the interior camera model chosen, to estimate boresight misalignment angles as well as drift and offset parameters of the IMU, and to compare the performance of 3K and 3K+ cameras in terms of accuracy and lens distortions.

For each campaign, a self calibrating bundle adjustment is performed to estimate the interior orientation parameters of each camera. Tie points are matched automatically and all control and check points are measured manually. Additionally, the GPS positions of the projection centres are introduced into the bundle adjustment. A subset of a physical distortion model (FRASER 1997) is chosen for the calibration. Up to nine additional parameters are introduced into the calibration: the focal length c , the coordinates of principal point x_0 and y_0 , two radial symmetric distortion parameters A_1 and A_2 , two asymmetric parameters B_1 and B_2 , and finally a scaling C_1 and an affine shearing parameter C_2 . At the radius R_0 the radial symmetric distortion is zero by definition, which avoids too high distortion values at the edges and reduces the correlation with the focal length. The radius R_0 was set to 0.014 m, which corresponds to a third of the sensor diagonal. Assuming x and y to be the distorted image coordinates, the corrections Δx and Δy are then calculated by the following equations.

$$\begin{aligned} \Delta x = & x_p + A_1 x_* (r^2 - R_0^2) + A_2 x_* (r^4 - R_0^4) \\ & + B_1 (r^2 + 2x_*^2) + B_2 2x_* y + C_2 y \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \Delta y = & y_p + A_1 y (r^2 - R_0^2) + A_2 y (r^4 - R_0^4) \\ & + B_1 (r^2 + 2y^2) + B_2 2x_* y \end{aligned} \quad (2)$$

with $r = \sqrt{x_*^2 + y^2}$ and $x_* = \frac{x}{C_1}$. The undistorted image coordinates x' and y' are then calculated by $x' = x + \Delta x$ and $y' = y + \Delta y$.

Fig. 6 shows distortion curves based on the results of the self calibrating bundle adjustment. The parameters B_1 , B_2 , C_1 and C_2 are

omitted as B_1 , B_2 , C_2 do not differ significantly from zero and the scaling parameter C_1 is close to one. As expected, the radial distortion of the 3K+ lenses is lower than of the 3K lenses. The maximum distortion at the chip corners of the 3K is 20 pixels compared to 8 pixels for the 3K+. Comparing cameras of the same type, the differences in radial distortion are below one pixel, whereas the principal point moves significantly for each camera and even moves for a single camera between the years. This movement gives a hint, firstly, that the estimation of the principal point may be biased by strong correlations with the exterior orientation parameters, and secondly, that the connection lens to camera body is not stable enough. The comparison of the calibration parameters obtained for the years 2008 and 2010 shows that there is a movement of the principal point of 157 μm in the y -coordinate. In fact, the principal point is weakly determined and changes in the lens-camera connection can be neither confirmed nor ruled out.

Additionally, the measured GPS positions of the projection centres must also be corrected in terms of the leverarm errors, GPS offsets and drifts, and the latency between image exposure and the registration at the GPS processor. All these errors influence the accuracy of the determined positions of the projection centres. By using differential GPS measurements in combination with Kalman filtering, the GPS offsets and drifts are negligible. The estimation of the GPS latency is highly correlated to interior camera parameters and is therefore neglected in further processing. Assuming latency not to be longer than 3 ms, which corresponds to a movement of the airplane of about 20 cm, and assuming a lever arm correctness of 10 cm, the resulting positioning error of the projection centre of 30 cm will move the principal point by about two pixels. In contrast to the principal point, the geometrical properties of the lenses and the focal length did not change significantly within the years. In particular, the radial distortion parameters only vary up to 10 % for the same lens type.

The chromatic aberrations of the lenses were estimated by comparing the results of the bundle adjustments using the single bands separately with the results using the RGB images. For this purpose, all tie and control

points measurements were performed separately in the RGB image and in the images corresponding to the single bands. As visualized in Fig. 6, no significant differences in the radial distortion parameters between the red and blue bands were encountered (the green band is between the red and the blue band).

We also compared two models for radial distortion. In the first model, we only used the parameter A_1 , whereas in the second model we used both A_1 and A_2 . Comparing the distortion curves achieved for these two models (Fig. 6, centre), differences of up to three pixels can be observed at the edges. An additional analysis of the residuals shows that the one-parameter model cannot replace the two parameter model, as this will cause up to three pixels error. The two-parameter model of radial distortion seems to be sufficient, as on the one hand other

distortion parameters are not significantly estimated and on the other hand the image residuals do not show any systematic behaviour. In Fig. 7, the residual prediction errors are plotted, which are averaged in a grid defined in the images. Systematic patterns of these averaged errors which would reveal model errors of the chosen calibration model are not visible. The maximum error encountered for 3K+ lies on the chip corners and is about 1.5 pixels.

4 Performance Evaluation

4.1 Geometrical Accuracy

In this section, the overall accuracy of the optical sensors is evaluated. The evaluation has two parts. The first part is the evaluation of

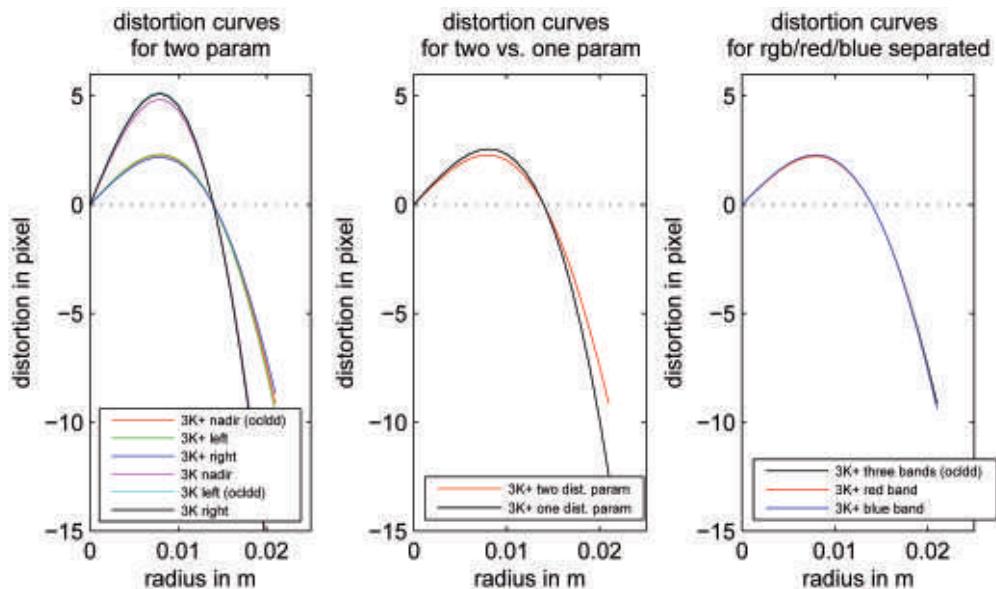


Fig. 6: Visualization of the 3K/3K+ lens distortion parameters, occluded = occluded.

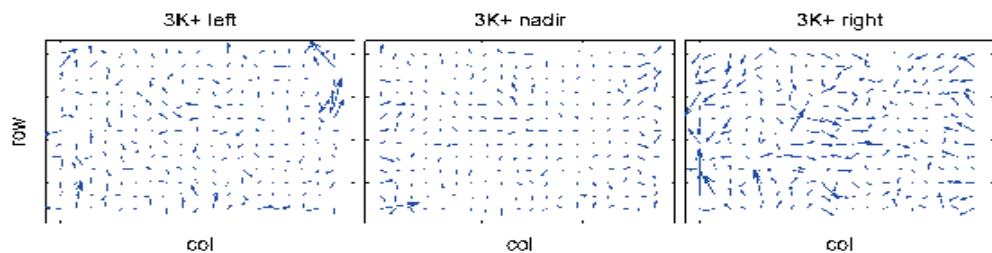


Fig. 7: Separate plots of averaged residual prediction errors for each 3K+ camera.

the performance of bundle adjustment based on ground control points and the second part is the performance of direct georeferencing, which is only based on the GPS/IMU data without any additional control information.

The accuracy potential of the sensor in the bundle adjustment is assessed using the theoretical standard deviations at the check points from bundle adjustment and the empirical RMSE (root-mean-square error) using the differences between estimated and measured coordinates of the check points. These values are listed in Tab. 4, separately for the 3K and 3K+ datasets from the years 2008 and 2010. In general, the errors are smaller in 2010 than in 2008, when the images were slightly defocused and thus the control and tie points were not determined precisely enough. The performance of the 3K and 3K+ sensors in 2010 is comparable in the order of around 0.3 m in the XY-coordinate and 0.6 m in the Z-coordinate. Taking into account the errors of GPS mea-

sured check points and targeting errors, the empirical RMSEs for all datasets are slightly higher than the theoretical ones, but the differences are still not significant.

The accuracy of the direct georeferencing depends mainly on the performance of the positions and attitudes determined by GPS/IMU measurements. Most crucial is the determination of the image attitudes with respect to the reference coordinate system, which implies several transformation steps from the image coordinate system to the reference coordinate system (MÜLLER et al. 2002). One important transformation step rotates the image coordinate system into the IMU coordinate system, which is called boresight misalignment. This misalignment is usually determined by a bundle adjustment using the attitudes determined from IMU measurements and additional control information. Another transformation step is the rotation from the IMU coordinate system into a local tangential earth fixed coordi-

Tab. 4: Theoretical and empirical accuracy from the bundle adjustment (NI: number of images, NP: number of object points, q: across overlap, p: along overlap) at NC check points.

3K (*)		3K Nadir (**)		3K+ (**)	
σ_{theor}	RMSE _{empir}	σ_{theor}	RMSE _{empir}	σ_{theor}	RMSE _{empir}
X	0.128 m	0.647 m	0.094 m	0.280 m	0.083 m
Y	0.147 m	0.651 m	0.101 m	0.388 m	0.078 m
Z	0.325 m	0.576 m	0.523 m	0.767 m	0.400 m

(*) Values from calibration 2008 (KURZ 2009)

(**) Values from calibration 2010

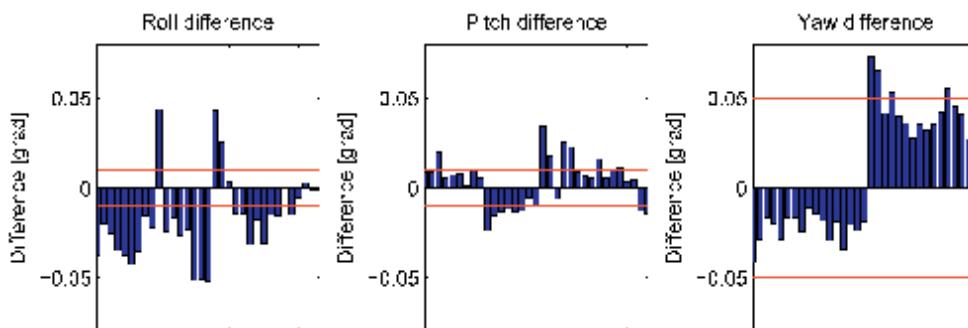


Fig. 8: Differences between reference image attitudes from bundle adjustment with image attitudes determined from IMU measurements and corrected for boresight misalignment. Red lines signalize the expected accuracy from the real-time IMU data.

nate system, which is described by the IMU-determined angles, roll, pitch, and yaw, whose accuracy depends on the type of the IMU and the way the angles are determined from the original IMU measurements. The real-time solutions required for the real-time processing chain are less accurate by up to a factor of two than the solutions obtained after post-processing.

Additional errors deteriorate the accuracy of the final rotation. Fig. 8 shows the differences between the image attitudes determined by direct georeferencing and the image attitudes estimated by bundle adjustment. The differences encountered are partly larger than the accuracy of the IMU data. For instance, the maximum difference of the roll angle is 0.05° , whereas the accuracy of a roll angle determined from IMU measurements is 0.01° . The main reasons for these differences are a decoupling of the IMU and sensors due to vibrations, shocks, and platform deformations, and errors both in the boresight misalignment determination and in the reference bundle adjustment. The decoupling effects are mainly caused by an unfavourable mounting of the IMU in the airplane (relatively far away from the sensors) due to the special configuration of the DLR airplanes. Mounting the IMU directly on the sensor platform may reduce the errors and is planned for future integrations of the system into the aircrafts. Nevertheless, the performance of high-end sensors (CRAMER et al. 2000) cannot be reached as in the low-cost environment, the optical sensor and the other hardware components except the GPS/IMU do not achieve the standards of high-end systems.

By projection of the maximum roll errors of around 0.05° , the maximum pitch errors of around 0.03° , and the maximum yaw errors of 0.05° , the maximum positioning error on the ground is calculated for a flying height of 1000 m above ground. The range goes from 1.45 m in nadir to 3.25 m and 3.33 m at the edges of the FOV for the 3K/3K+ and CHICAGO configurations, respectively. There is a linear dependence of these positioning errors from the flying height. In Fig. 9 the resulting positioning errors are illustrated for the two flight configurations with a flying height of 1000 m above ground. Compared to these er-

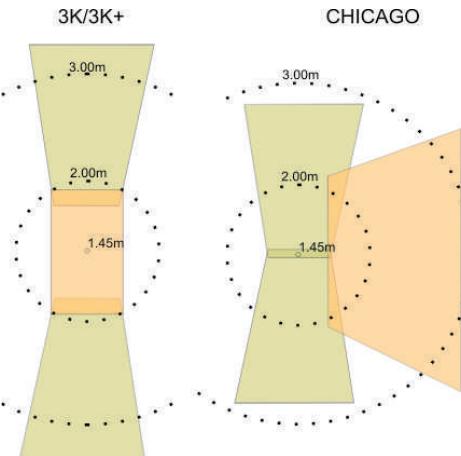


Fig. 9: Maximum positioning error by direct georeferencing for the 3K/3K+ and CHICAGO flight configuration.

rors caused by inaccurate image attitudes, the positioning errors due to inaccurate projection centres are negligible, as lever arm deviations, latencies, and GPS errors together do not exceed 0.3 m (assuming a differential GPS solution, latencies < 3 ms, and precisely measured leverarms).

4.2 Radiometric Performance

This section evaluates the radiometric properties of the 3K/3K+ camera system. The goal is to optimize the use of off-the-shelf cameras for airborne monitoring purposes, i.e. to acquire images with best resolution and contrast in the presence of forward motion blurring and changing incoming radiance. In contrast to high level photogrammetric systems, the forward motion blurring of off-the-shelf cameras is reduced by short exposure times, which worsens the conditions for achieving radiometrically optimal images. As the internal processing of the camera has no changeable parameters, it works as a black box and there is no further influence on how they affect the radiometric quality. The remaining free configurable parameters are the f-number and the ISO speed which are dependent on each other, so that only an appropriate combination allows the best possible imaging result. Concise information about the influence of these

parameters on the radiometric performance is given in the following paragraphs.

The f-number is the focal length divided by the “effective” aperture diameter. A low f-number (e.g. 2.0) passes a lot of light to the sensor but also results in blurring due to the larger circle of confusion. However, the image sharpness in the focal plane varies with the relative aperture size. Additionally, there is optical vignetting which is sensitive to the f-number and lens architecture. In general the blurring can be cured by a reduction in aperture of 2 steps. Due to the lens properties of 3K/3K+ f-numbers greater than 4.0 are capable to produce satisfying results. For instance Zeiss Makro Planar 2 has aperture range of f/2 to f/22.

The shutter speed is indirectly proportional to the light reaching the sensor. As mentioned, short exposure times are aspired to reduce forward motion blurring. A flying velocity of e.g. 70 m/s at 1000 m altitude, with a shutter speed of 1/2000 s results in 3.5 cm blurring which approximately corresponds to 1/4 pixel. Higher shutter speed values reduce the incoming

light and thus enforce the f-number and film speed to inappropriate values. Our test supports the assumption that a shutter speed of 1/2000 s is an acceptable compromise. Fig. 10 shows the edge spread functions (ESF) and their corresponding line spread functions (LSF) based on an image with shutter speed 1/2000 s in Fig. 10a and one with shutter speed 1/8000 s in Fig. 10b. Comparing both LSFs shows that the image with lower shutter speed has sharper edges (sigma 0.73 respectively sigma 0.92). The reason is obviously that a higher shutter speed is not able to compensate the lower f-number.

ISO speed is the measure of the sensor’s sensitivity to light. Higher values result in noisy images. Therefore our aim is a low ISO speed. But this can be an impossible requirement, especially on cloudy days. The impact of different ISO speed parameters can be observed in Figs. 11a and 11b, which illustrates that higher ISO values cause noisy images.

A test campaign with 3K/3K+ sensor was performed with different f-number, shutter speed values and ISO settings to find out

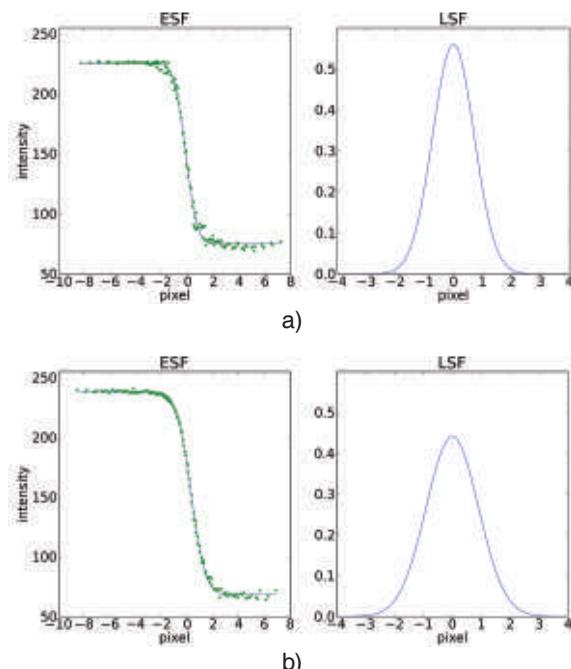


Fig. 10: a) Edge spread and line spread function ($\sigma = 0.73$ pixels) of image with shutter speed 1/2000 s, f-number 4.0, ISO 640, b) Edge spread and line spread function ($\sigma = 0.92$ pixels) of image with shutter speed 1/8000 s, f-number 2.8, ISO 1250.

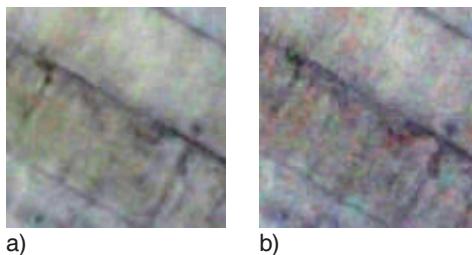


Fig. 11: Visualization of 3K sensor noise (stretched images); a) ISO 250, 1/2000 s, f2.8, b) ISO 1600, 1/2000 s, f5.6.

the best camera settings with highest effective GSD. The range of settings for the shutter speed was 1/1000 s to 1/8000 s, for the f-number 2.8 to 5.6, and for the ISO value 250 to 1600. The campaign showed that the best results are obtained by taking fixed settings for the exposure time and the f-number, while the ISO setting is variable according to the illumination conditions. The settings vary from case to case, for instance areas made from concrete have a higher reflectance than forests.

The resolution (effective GSD) of the 3K/3K+ camera system was determined by a Siemens star (Fig. 12) with a diameter of five metres. According to that experiment we obtain an effective GSD of 18.6 cm for the 3K and 13.2 cm for the 3K+ camera compared to the theoretical GSD of 15 cm respectively.

13 cm from 1000 m above ground. Also the signalized edge is sharper in the 3K+ image than in the 3K image. The standard deviation of the LSF is $\sigma = 1.07$ pixels for the 3K image and $\sigma = 0.69$ pixels for the 3K+ one.

4.3 Real-time Performance

This section focuses on the processing time of the data acquisition and orthorectification processes. Switching to newer and faster hardware can accelerate the on-board processing, but changing hardware of aircraft equipment always involves a complex and protracting certification procedure. Therefore, it makes sense to concentrate on methodic improvements and run tests with a given hardware specification (Tab. 5).

The test setups in Tab. 6 use the same input data but each of the tests runs a different program version. Test A runs in a single thread on one CPU core and takes 13600 ms including memory transfers. It serves as a reference for the following GPU tests. Test B takes 2251 ms for the test image, where 63 ms and 137 ms are spent on the host-to-GPU-memory transfer and on the GPU-to-host-memory transfer, respectively. Here, the real-time constraint of 24 Mbit/s demanded for the burst mode can be held, as the processing speed achieves about 31 Mbit/s.

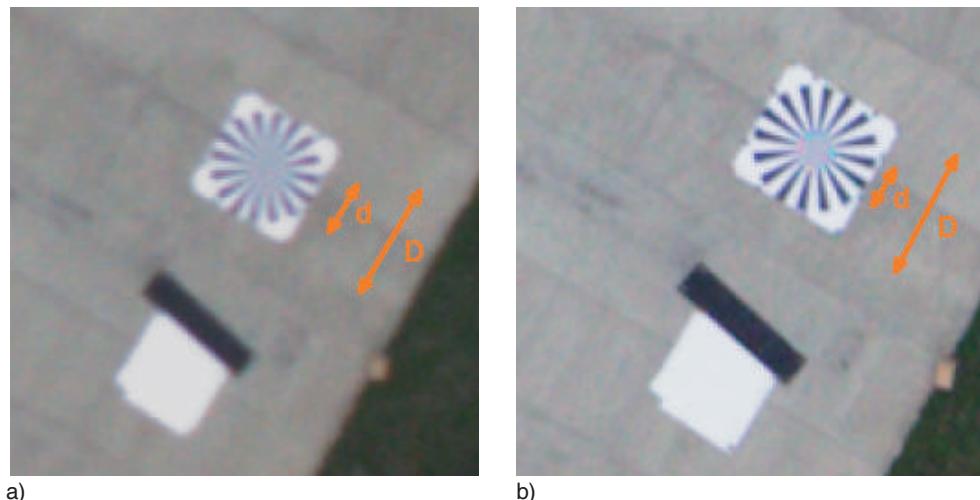


Fig. 12: Siemens star and signalized edge in a) 3K image, b) 3K+ image.

Tab. 5: On-board hardware and software configuration.

Hardware		Software		Test data	
CPU	Intel Core 2 Duo E8400 @ 3GHz	Compiler	nvcc release 4.0	Size input image	4992 x 3328 pixel
RAM	2.0 GB	Display drivers	NVIDIA Developer Drivers for Linux 270.41.19	Size output image	7257 x 5182 pixel
Video	Nvidia GeForce 9800 GTX, 512 MB, Compute Capability 1.1	Debugging tools	NVIDIA Compute Visual Profiler 4.0.12, Cuda-gdb release 4.0	GSD	0.2 m
Main Board	Intel Desktop Board DG35EC			DEM resolution	25 m

Tab. 6: Test cases of different versions of the orthorectification process.

	Host-to-GPU transfer time (ms)	Kernel execution time (ms)	GPU-to-Host transfer time (ms)	Total time (ms)
Test A: CPU	---	---	---	13600.0
Test B: GPU	63.3	2051.1	137.5	2251.9
Test C: GPU	41.5	81.4	136.6	259.5
Test D: GPU	41.5	79.2	134.8	255.6

For further optimization, the kernel execution time is reduced in Tests C and D by avoiding data transfers between host and GPU and by moving constant parameters from the uncached global GPU memory to cached memory areas. For this purpose, the whole input image and the DEM are transferred to the GPU memory before the orthorectification starts. After complete calculation of the output image, it will be transferred back to the host. There are no further host-GPU transfers in between. Test configuration C uses nearest neighbour interpolation, whereas configuration D uses bilinear interpolation. Both run a version which reduces the memory data transfers to minimum and puts all constant parameters required for orthorectification in the cached constant memory area. The usage of a cached memory results in a significant speedup of the kernel execution time by a factor of 25 compared to Test B. When comparing tests C and D, the use of bilinear interpolation has no effect on the performance, which is remarkable given that the processing time

of CPU-based orthorectification programs increases significantly with more complex interpolation methods.

In conclusion, the implementation of Test D is 53 times faster than the CPU implementation and meets the timing constraints with a data rate of 282 Mbit/s. In other words, the cameras can operate with a continuous shooting speed of 3 to 4 frames per second without risking a delay by the orthorectification process.

5 Conclusions

In this paper, the performance of low-cost camera systems for real-time mapping applications are exemplarily evaluated based on already existing sensor systems operated at DLR. These sensors are designed for traffic and disaster monitoring as well as for monitoring during mass events and should fulfill certain requirements in terms of cost, weight, and volume. The sensor systems are evaluated

in terms of FOV, resolution, processing time, geometrical accuracy, and radiometric properties.

The sensors are designed to cover wide areas with high resolution. Thus, three cameras with different viewing directions are arranged on a sensor platform. The real-time capacity of the established processing chain is evaluated and tested. Based on this chain, images acquired with a frame rate of 4 frames per second can be read out, orthorectified, and selective images can be sent down to the ground station without delay (i.e. the first image of each camera "burst"). Even traffic parameters can be extracted automatically in real-time on-board (ROSENBAUM et al. 2008). The real-time implementation is based on a concept by (THOMAS et al. 2008), GPU-based orthorectification, and fast image processing libraries.

At two test sites, the sensors were geometrically calibrated by a bundle adjustment with self calibration in the years 2008 and 2010. The results showed that focal length and lens distortion parameters are stable over the years whereas the principal point is weakly determined and, thus, deformations of the camera lens connection can neither be ruled out nor confirmed. The self calibration with additional parameters describes the camera geometry well; the remaining residuals are random with a maximum of 1.5 pixel. The accuracy achieved at the object points were calculated based on GPS-measured check points. The RMSEs range is from 0.14 m to 0.38 m in the XY- and from 0.45 m to 0.76 m in the Z-coordinates for all camera systems. Higher errors in the XY-coordinates of 0.65 m in the 2008 campaign are caused by focusing problems of the 3K camera system.

Besides, the performance of the direct georeferencing based on GPS/Inertial measurements is evaluated. Most crucial is the accuracy of the image attitude determination which highly dominates the accuracy that can be achieved. Differences of reference image attitudes with IMU data show deviations of about 0.05°, which exceeds the basic IMU accuracy. Reasons for this may be deformations between cameras and IMU positions due to shocks, vibrations, and the long distance between sensor and IMU. Finally, based on the maximum deviations encountered the

obtained accuracy is 1.45 m in the nadir and around 3 m at the FOV edges at a flying height of 1000 m above ground. Nevertheless, the geometrical requirements coming from the envisaged real-time applications are fulfilled, except for real-time 3D applications where the relative accuracy has to be improved e.g. by a bundle adjustment.

The radiometric properties of the sensors in terms of resolution and luminosity are improved with the use of Zeiss lenses. Tests are made to find out the best camera settings for highest resolution. Due to the forward motion blurring, short exposure times are recommended, which forces the f-number and film speed to more inappropriate values. Best results were obtained with fixed f-number e.g. 4.0 and shutter speed e.g. 1/2000 s in combination with variable ISO values adjusted to the illumination conditions. Images acquired with higher ISO values during bad weather conditions and during flights below clouds are noisier but still acceptable e.g. for traffic parameter extraction. Even in total darkness, vehicle headlights are visible in airborne images with high ISO values, low f-number, and shutter speed around 1/1000 s.

Further investigations aim to replace the cost-intensive IMU with a real-time software resolution. Besides, additional processors like a DSM generator and a tool for qualitative crowd monitoring as well as people tracking will be developed and included in the real-time processor chain.

6 Acknowledgments

The authors would like to thank ROLF STÄTTER (DLR), HANS-JOACHIM SCHNEIDER (University Munich), and ANNE DE LA BORDERIE (University Lyon) for tedious ground control point measurements as well as PHILIPP RATHKE and THOMAS STEPHAN (both DLR) for their support in the design of the CHICAGO sensor.

References

- COPPINGER, R., 2010: Fuel cell motor-glider basis for endurance UAV. – Flight International **177** (5233): 25.

- CRAMER, M., STALLMANN, D. & HAALA, N., 2000: Direct Georeferencing using GPS/Inertial Exterior Orientations for Photogrammetric Applications. – IAPRS, **XXXIII**, Part B3: 198–205, Amsterdam, Netherlands.
- CRAMER, M., 2010: The DGPF-Test on Digital Airborne Camera Evaluation – Overview and Test Design. – PFG 2/2010: 73–82.
- ERNST, I., SUJEW, S., THIESSENHUSEN, K., HETSCHER, M., RASSMANN, S. & RUHÉ, M., 2003: LUMOS – airborne traffic monitoring system. – Intelligent Transportation Systems **1**: 753–759.
- FRASER, C.S., 1997: Digital camera self-calibration. – ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing **52** (4): 149–159.
- HAARBRINK, H. & KOERS, E., 2006: Helicopter UAV for photogrammetry and rapid response. – [online] Proceedings of the 2nd International Workshop: The Future of Remote Sensing, VITO and ISPRS Intercommission Working Group I/V Autonomous Navigation, Antwerp, Belgium.
- IGI, 2011: Ingenieur Gesellschaft für Interfaces mbH. – <http://www.igi.eu> (22.12.2011).
- KOZEMPEL, K. & REULKE, R., 2009: Camera Orientation Based on Matching Road Networks. – Image and Vision Computing New Zealand, IVCNZ '09: 237–242, 24th International Conference.
- KURZ, F., 2009: Accuracy assessment of the DLR 3K camera system. – DGPF Tagungsband **18**, Jahrestagung.
- KURZ, F., ROSENBAUM, D., LEITLOFF, J., MEYNBERG, O. & REINARTZ, P., 2011: Real-time camera system for disaster and traffic monitoring. – Proceedings of the International Conference on SMPR (Sensors and Models in Photogrammetry and Remote Sensing) **2011**: Tehran, Iran.
- LEITLOFF, J., HINZ, S. & STILLA, U., 2010: Vehicle Detection in Very High Resolution Satellite Images of City Areas. – IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing **48** (7): 2795–2806.
- LEHMANN, F., BERGER, R., BRAUCHLE, J., HEIN, D., MEISSNER, H. & PLESS, S., 2011: MACS – Modular airborne camera system for generating photogrammetric high-resolution products. – PFG 6/2011: 435–446.
- MÜLLER, R., LEHNER, M., MÜLLER, R., REINARTZ, P., SCHROEDER, M. & VOLLMER, B., 2002: A program for direct georeferencing of airborne and spaceborne line scanner images. – Proceedings of the ISPRS Commission I Symposium, Integrating Remote Sensing at the Global, Regional and Local Scale **1**: 148–153, Denver.
- NAGAI, M., CHEN, T., SHIBASAKI, R., KUMAGAI, H. & AHMED, A., 2009: UAV-Borne 3-D Mapping System by Multisensor Integration. – IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing **47** (3): 701–708.
- NVIDIA, 2011: CUDA C Programming Guide, version 4.0.
- PETRIE, G., 2003: Airborne digital frame cameras. The technology is really improving. – GEOInformatics **2003** (Oct/Nov): 18–27.
- ROSENBAUM, D., KURZ, F., THOMAS, U., SURI, S. & REINARTZ, P., 2008: Towards automatic near real-time traffic monitoring with an airborne wide angle camera system. – European Transport Research Review **1** (1): 11–12.
- SASA, S., MATSUDA, Y., NAKADATE, M. & ISHIKAWA, K., 2008: Ongoing research on disaster monitoring UAV at JAXA's Aviation Program Group. – SICE Annual Conference **2008**: 978–981.
- SCHARDT, M., RAGGAM, H., WACK, R., OFNER, M., GUTJAHR, K. & KOUDELKA, O., 2010: Luftgestützte Low-Cost-Aufnahmeplattform zur Unterstützung von Katastropheneinsätzen. – Dreiländertagung **2010**: Wien, Austria.
- SHASTRY, A.C. & SCHOWENGERDT, R.A., 2005: Airborne video registration and traffic-flow parameter estimation. – Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions **6** (4): 391–405.
- SIRMAEK, B. & REINARTZ, P., 2011: Automatic crowd density and motion analysis in airborne image sequences based on a probabilistic framework. – Proceedings of the 2nd IEEE ICCV Workshop on Analysis and Retrieval and Tracked Events and Motion in Imagery Streams (ARTEMIS'11) **2011**: Barcelona, Spain.
- SRINIVASAN, S. & LATCHMAN, H., 2004: Airborne traffic surveillance systems: video surveillance of highway traffic. – The 2nd ACM international workshop on Video surveillance & sensor networks, 131–135.
- SRS, 2011: Schulze Radio Systems. – <http://www.srs.de> (22.12.2011).
- THOMAS, U., ROSENBAUM, D., KURZ, F., SURI, S. & REINARTZ, P., 2009: A new Software/Hardware Architecture for Real-Time Image Processing of Wide Area Airborne Camera Images. – Real-Time Image Processing Journal **4**: 229–244.
- ZONGJIAN, L., 2008: UAV for mapping – low altitude photogrammetric survey. – IAPRS **XXXVII** (B1), Beijing 2008.
- ZHU, K., d'ANGELO, P. & BUTENUTH, M., 2010: Comparison of Dense Stereo using CUDA. – 11th European Conference on Computer Vision (ECCV), Kreta, Griechenland.

Addresses of the authors:

Dr.-Ing. FRANZ KURZ, Dipl.-Ing. SEBASTIAN TÜRMER, Dipl.-Ing. OLIVER MEYNBERG, Dr. rer. nat. DOMINIK ROSENBAUM, Dipl.-Ing. HARTMUT RUNGE, Prof. Dr.-Ing. PETER REINARTZ, German Aerospace Center,

Remote Sensing Technology, Münchner Straße 20,
82234 Wessling, Germany, Tel.: +49-8153-28-2764,
-3600, -3534, -2678, -1364, -2757, Fax: +49-8153-
281444, e-mail: firstname.lastname@dlr.de (ü = ue)

Manuskript eingereicht: November 2011
Angenommen: Januar 2012

Dr.-Ing. JENS LEITLOFF, Karlsruhe Institute of Technology, Institute of Photogrammetry and Remote Sensing, Englerstraße 7, 76131 Karlsruhe, Germany, Tel.: +49-721-608-47410, e-mail: jens.leitloff@kit.edu



Age Determination of Martian Low Shield Volcanoes by Crater Size-Frequency Measurements

FELIX JAGERT, Bochum & ERNST HAUBER, Berlin

Keywords: Volcanism, crater, planetary, remote sensing, Mars

Summary: Based on high-resolution images of the current NASA-spacecraft *Mars Reconnaissance Orbiter*, the technique to determine absolute ages of planetary surfaces by impact crater counts is demonstrated. The results will be useful to interpret geologic processes on the planet's surface, such as the history of volcanic activity. This paper describes the statistical technique for a low shield volcano in the Tharsis region and its adjacent plains with the discussion of the results and problems. Planetary remote sensing data are processed and prepared for the later use in GIS environments and statistical analysis. The crater counts were done independently with two different cameras, which provided comparable results. The derived absolute ages are in good agreement with the results of earlier works.

Zusammenfassung: Altersbestimmung von niedrigen Schildvulkanen auf dem Mars anhand von Kratergrößen-Häufigkeitsverteilungen. Auf Grundlage der aktuellen, hochauflösenden Bildaten der NASA-Raumsonde *Mars Reconnaissance Orbiter* wird die etablierte Methode der absoluten Altersbestimmung planetarer Oberflächen anhand von Kraterhäufigkeiten demonstriert. Die Ergebnisse dienen der wissenschaftlichen Interpretation geologischer Prozesse auf dem Mars, wie etwa der Untersuchung der vulkanischen Aktivität des Planeten. In diesem Beitrag wird diese statistische Methode beispielhaft für einen Schildvulkan und dessen Umgebung in der Tharsis-Region angewandt, Ergebnisse diskutiert und Probleme angesprochen. Dazu wurden die planetaren Fernerkundungsdaten prozessiert, für die spätere Verarbeitung in Geographischen Informationssystemen vorbereitet und statistisch ausgewertet. Zum Vergleich der Kraterstatistiken wurden die Aufnahmen von zwei verschiedenen Kameras verwendet, die gleichartige Ergebnisse lieferten. Die bestimmten Alter stimmen sehr gut mit den Ergebnissen vorheriger Autoren überein.

1 Introduction and Related Work

It is known for decades that the planet Mars was volcanically active in its geological past. A major goal in planetary geology is to investigate the times of activity and whether the volcanoes are now extinct or dormant. These results will be a key to determine the history of late-stage volcanism of the planet and will help to shed light on the endogenic evolution of Mars.

Much research was done for the big shield volcanoes (e.g., Olympus Mons) in the Tharsis region in the western Martian hemisphere, a huge topographic bulge with widespread vol-

canic resurfacing. Remote sensing images and topographic data, however, show also several clusters of small, low shield volcanoes in Tharsis.

These Martian low shield volcanoes and associated landforms show morphologic characteristics that are comparable with basaltic volcanic provinces on Earth (PLESIA 1981, HAUBER et al. 2009). Plains volcanism of the eastern Snake River Plain in Idaho (USA) can be considered as possibly the best terrestrial morphological analogue for this type of volcanism. It is defined as being an intermediate style between flood basalts and the Hawaiian shields (GEELEY 1982). The Martian shield

clusters are overlapping each other and form a spatially extended volcanic unit with hundreds of vents. Single shield edifices have average diameters of several tens of kilometers. Although a widespread eolian dust mantle is masking the spectral signature in large parts of Tharsis, the observable geomorphologic features show that the Martian low shield volcanoes are most likely consisting of basaltic lavas with very low viscosity (HAUBER et al. 2009, HAUBER et al. 2011).

To reconstruct the timeline of volcanic activity of the low shields clusters, HAUBER et al. (2011) recently produced a Tharsis-wide chronology by crater counts and also estimated lava rheologies. Most small volcanoes have ages of <100 million years (Ma) and two clusters are older with ages of a few hundred million years up to ages of 0.3–2.9 billion years (Ga) (HAUBER et al. 2011). The results show that plains volcanism was active very recently in the last few percent of Mars' geologic history. An ongoing investigation of the volcanic vents in this area could probably detect late-stage eruptions that were even more recent. In conclusion, it cannot be excluded that Mars is volcanologically only dormant, and might be active in the near future.

The geological mapping and investigation of small surfaces on Mars is possible since cameras on planetary space probes are transmitting high-resolution data with resolutions of meters per pixel. In our study the high-resolution data of the *Mars Reconnaissance Orbiter* (MRO) have been used for geological mapping and the preparation of crater counts to estimate the absolute age of a low shield volcano and the surrounding plains in Noctis Labyrinthus, in the east part of Tharsis. In addition a laser altimetry track, also acquired by the *Mars Global Surveyor* (MGS), has been used to construct a profile for morphometric analysis.

In the past, crater counts were done using a stereo comparator with analog images. Nowadays, the complete workflow can be performed digitally with Geographic Information Systems (GIS). The aims of this study are to demonstrate the age determination of planetary surfaces by impact crater counts and the integration of planetary remote sensing data into GIS.

2 Age Determination by Impact Crater Counts

The age determination of planetary surfaces by impact crater counts is an important and established tool to interpret geologic surfaces and stratigraphic relationships on other planets and moons. Due to the random accumulation of impact craters on a planetary surface over a prolonged period, it is possible to assess its age. An intense modification by erosion, deposition of material or coverage by lava flows is resetting the surface-age to zero and the crater accumulation is starting again (HARTMANN & NEUKUM 2001).

It is possible to map a geologic unit and to establish relative and absolute ages by crater size-frequency distributions, a technique described in detail by HARTMANN & NEUKUM (2001) and IVANOV (2001), NEUKUM & WISE (1976) and references therein. In the past, lunar crater frequencies could be inverted to absolute ages by comparison with Apollo rock samples that were dated by radiometric crystallization ages. A chronology function could be approximated which is describing a nearly constant cratering rate during the last 3 Ga and an exponentially decreasing rate before 3 Ga (early intense bombardment). The cratering chronology model of the Moon was adjusted for Mars taking into account several

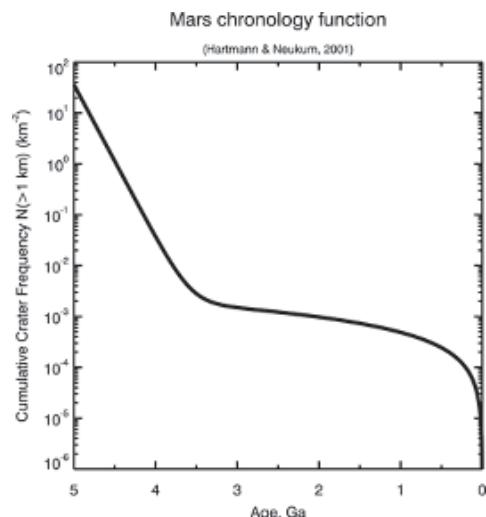


Fig. 1: Mars chronology function by HARTMANN & NEUKUM (2001).

parameters like different orbital mechanics, crater scaling and impact flux (NEUKUM et al. 2010) (Fig. 1). Important for the adaption of the lunar chronology to the Martian chronology was the estimation of the cratering rate of Mars relative to the Moon (production function). With this function the production-rate of craters of any given diameter on a given surface is assumed to be known (HARTMANN & NEUKUM 2001, IVANOV 2001).

These established methods enable to determine relative and absolute ages of a given surface by cumulative crater size-frequency distributions (CSFD). The idea is to plot the crater counts as CSFD normalized to a unit area and to fit the production function to the data points. With a correct fit the chronology function can calculate absolute surface model ages (MICHAEL & NEUKUM 2010).

HARTMANN & NEUKUM (2001) calculated that crater counts provide dates with an uncertainty within a factor of 2 for ages <3.5 Ga and ± 100 Ma for ages >3.5 Ga, caused mainly by flux uncertainties. This implies that all estimated absolute ages can be either too young or too old. The observation of the recent Martian impact-rate by repeated remote sensing images over a seven-year period actually showed that the predicted rate is in close agreement with the current observed impact-rate (HARTMANN 2007, WERNER 2009).

3 Investigation Area

As an example to demonstrate the technique of crater size-frequency measurements, we selected a low shield volcano in the north

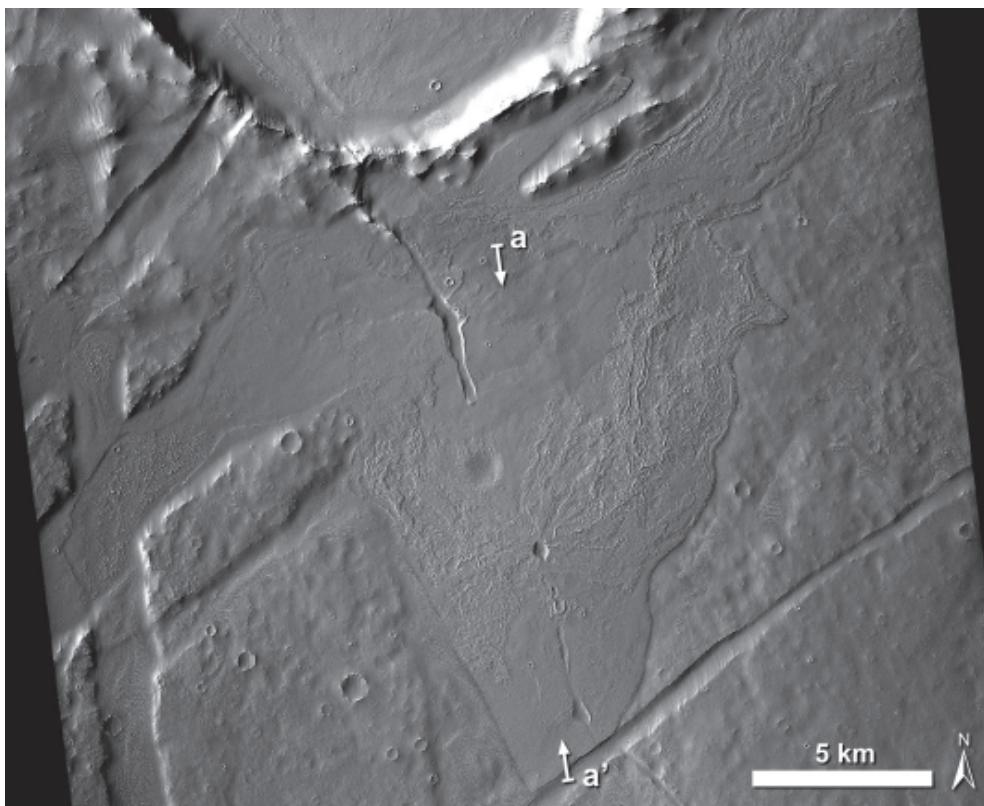


Fig. 2: Low shield volcano in the north of Noctis Labyrinthus, centered at $-3.65^{\circ}\text{N}/253.27^{\circ}\text{E}$ (CTX-image B02_010226_1765_XI_03S106W; taken in October 2008). The marked profile a - a' is shown in Fig. 3. The shield shows several summit craters and elongated vents and is mainly bordered by faults. The subdued circular depression in the NW of the main summit is not an impact crater but rather a collapse structure induced by tectonics.

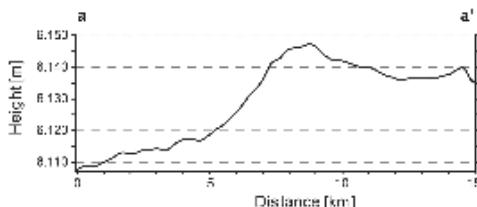


Fig. 3: Topographic MOLA-profile, crossing the low shield volcano from a-a'. The volcano has a height of only a few tens of meters and is sloping to north.

of Noctis Labyrinthus in the eastern part of Tharsis. The study site is a transitional zone between the volcanic plains in Tharsis and a region strongly modified by tectonics (Fig. 2). The fault trends in this area are mainly oriented NNW/SSE, N/S and ENE/WSW. The region shows much more craters than the lava plains and is covered by an eolian dust layer, which is also visible as dunes. This low shield was chosen because it is clearly distinguishable from the surroundings. The eruption took place at several summit craters and elongated vents, which are aligned along a tectonic trend oriented NNW/SSE. The topographic profile (Fig. 3) shows the morphometry of the main summit, which has a height of only a few tens of meters with a base sloping downwards to north. The general slope of the terrain forced the lava to flow northwards, where it drained into grabens in ENE/WSW direction or was stopped by an old crater rim. The observed morphometry and gentle slopes of the volcanic construct emphasize the results of HAUBER et al. (2011) that this type of volcanism is consisting of basaltic lavas with low viscosity.

4 Data and Methods

4.1 Remote Sensing Data

We used images of the *Mars Reconnaissance Orbiter*, a planetary space probe which is orbiting Mars since 2006. There are two cameras onboard: The panchromatic images of the *Context Camera* (CTX) are ideal to cover an entire shield construct with a swath-width of ~30 km and a spatial resolution of ~5.5 m/pixel. The panchromatic and multispectral images of the *High Resolution Science Experiment*

(HiRISE) have a swath-width of about ≥3 km at 200 km altitude with resulting resolutions of about 0.25–0.3 m/pixel (MALIN et al. 2007, McEWEN et al. 2007). The satellite acquired simultaneous observations with the two cameras of this site in October 2008, which have been selected for crater counts. These two observations made it possible to date the volcano by independent crater counts at different ranges of spatial resolutions to verify the results of the CSFDs.

In addition, data of the *Mars Orbiter Laser Altimeter* (MOLA) of the *Mars Global Surveyor* (MGS) Mission have been used for topographic analysis. This instrument measured topographic elevations of the entire planet with orbital nadir-tracks with an along-track shot spacing of ~300 m (vertical accuracy ~1 m) (SMITH et al. 2001). A single track of this dataset was generated directly over the main summit, which was used to draw a profile of the shield construct (Fig. 3).

Planetary remote sensing data are accessible through the *Orbital Data Explorer* (ODE). The ODE is a web-portal which is distributing the data of several planetary missions from NASA and ESA for Mars, Moon and Mercury at no cost (WANG et al. 2011).

4.2 Pre-Processing

The software ArcGIS 9.3/10 from Esri was used for mapping and crater counts. Most planetary data cannot be directly imported into commercial GIS environments. Therefore, several processing steps are essential.

The planetary images were pre-processed with the *Integrated Software for Imagers and Spectrometers* (ISIS 3) for LINUX, a software developed by the USGS (*U.S. Geological Survey*) and NASA, with multi-mission capabilities for handling data acquired by several planetary space probes. The camera models, spacecraft and planetary ephemerides and the definition of planetary bodies (in our case: Mars) is completely included in this software package (ANDERSON et al. 2004, ELIASON 1997, GADDIS et al. 1997).

With ISIS, the CTX data have been radiometrically calibrated (including the removal of systematic noise) and geometrically recti-

fied from raw-instrument data to a map-projected image. To minimize distortion, a sinusoidal-projection was used with the central meridian crossing the center of the image.

To import the CTX data into ArcGIS, the images were exported to PNG files with world files for georegistering. In ArcGIS the datum of Mars 2000 defined by the *International Astronomical Union* (IAU) was added (semimajor axis: 3396.19 km, semiminor axis: 3376.20 km), which is compatible to the datum used in ISIS.

The HiRISE data are accessible via ODE already completely radiometrically corrected and map-projected in the georegistered JPEG2000 file format. They are delivered in an equirectangular-projection and can be reprojected to avoid distortion. In our case the location is centered near the equator, a low-

distortion area of this cartographic projection without the need of reprojection. These georegistered JPEG2000 images are supported by ArcGIS and can be added instantly.

The topographic MOLA data are accessible through a query mask from the ODE. The single point-measurements can be downloaded in common file formats, e.g. as ASCII files or 3D-shapefiles for the use in ArcMap or ArcScene (ArcGIS). A resulting profile is shown in Fig. 3.

4.3 Mapping and Crater Counts

After the steps in section 4.2, the planetary remote sensing images can be used for further work in ArcGIS. The geological mappings and crater counts were done with the ArcGIS-

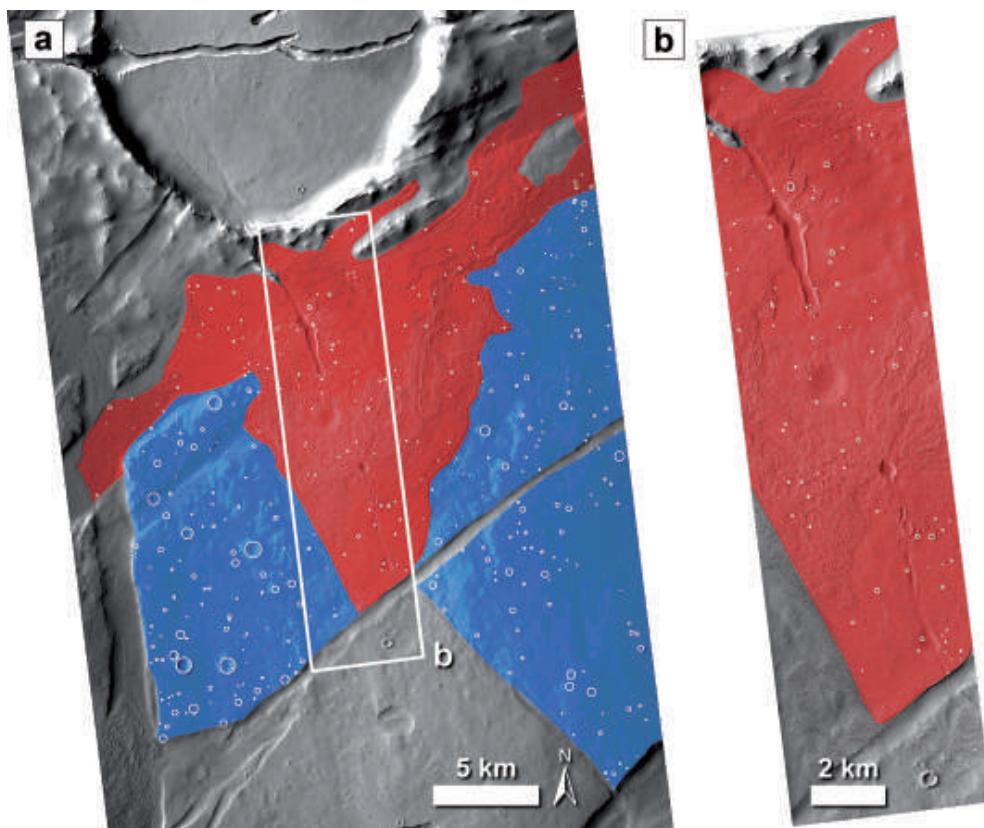


Fig. 4: Mapped stratigraphic units and counted craters (circles) superimposed onto the image strips. a) CTX image with volcano (red) and the adjacent plains (blue). The surrounding plains can probably reflect the buried, older age under the volcano. b) HiRISE image with the mapped volcano (red). This subset represents a statistical sample of the volcanic unit.

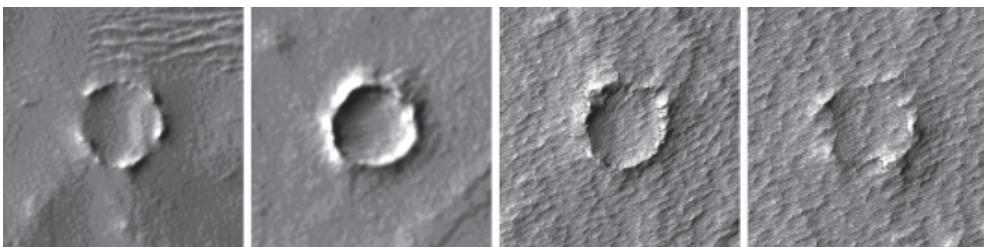


Fig. 5: Examples of impact craters in the counting areas. From left to right: Crater with diameter of 269 m (CTX), crater with diameter of 191 m (CTX), crater with diameter of ~105 m (HiRISE), heavily degraded crater with diameter of ~87 m (HiRISE).

extension *CraterTools* developed at the Freie Universität Berlin (FUB) (KNEISSL et al. 2011). With this tool it is possible to map the geological unit and to measure the crater-diameters (with a circle) inside the counting area. After this step it is possible to export the results for further analysis. A newer version of this tool is calculating the crater diameter internally without map distortion, independent of the projection used in ArcGIS.

The dating of a planetary surface makes only sense for homogeneous geological or geomorphological units. Different units should be mapped separately. Otherwise the crater populations of two different stratigraphic ages are merged and the CSFD would show a mixed age. Surfaces with steep slopes at scarps are not usable for crater counts because the impact craters are distorted or eroded by mass wasting processes. There is no need to map the complete geological unit. It is also sufficient to map and count an area which is representing a statistical sample of the unit (e.g., HiRISE image in Fig. 4).

Areas with secondary crater clusters should be excluded from the crater count because these types of craters are not included in the Martian crater production function (section 2). Secondary craters are impact craters which are generated by the debris (ejecta) of a large impact. Not every circular feature is an impact crater. Normal impact craters display nearly perfect circular shapes with a crater rim (Fig. 5). Inside of these craters are depressions, sometimes filled with sediments. Volcanic vents, calderas or other collapse structures can be mistaken for impact craters. The local context will help in most instances. When a pit crater is not circularly shaped, without a

rim and with lava flowing radial outwards, it is most likely not an impact crater but rather a volcanic vent.

For complete statistics we counted every impact crater (without building classes) with its centre in the counting area. A pre-selection of craters can generate a subjective result.

Two surfaces are dated at the investigation site (Fig. 4). The geological unit of interest is the low shield volcano in the CTX and HiRISE images. In addition, it is of interest to estimate the age of the surrounding plains, which is most likely the age of the surface buried under the volcano. Therefore, homogeneous surfaces adjacent to the volcano, bounded by tectonic faults, are mapped as well. In the SW, the plains are probably contaminated by secondary craters, hence they are not used for dating.

For the volcanic unit in the CTX image we mapped 133 craters with diameters ranging from 21–191 m. The surrounding plains contain 249 craters (diameters: 22–743 m) and are probably showing a weak contamination by some huge secondary craters in the western part. The HiRISE observation shows smaller craters due to the increased spatial resolution. The HiRISE image of the volcano contains 93 craters (diameters: 14–193 m).

4.4 Crater Size-Frequency Distributions

After the mapping of geologic units and crater counts, the recorded diameters of the craters and the size of the counting area can be imported into the software *Craterstats* developed at FUB. With this software it is possible to plot the CSFD of the crater counts and to fit it to the production function with a least squares

method. The crater count results are plotted as reverse-cumulative histogram with $\log N_{\text{cum}}$ vs. $\log D$. For this work we used the established Martian chronology model of HARTMANN & NEUKUM (2001) and the Martian production function of IVANOV (2001). The dating by CSFDs is discussed in detail by MICHAEL & NEUKUM (2010) and references therein.

For the volcanic surface a minimum diameter of >60 m was used for best fitting (adjacent plains: >250 m). N_{cum} shows a characteristic fall-off at smaller craters (Fig. 6). A technical reason for this trend is that it becomes more difficult to count small craters at the resolution limit. With complex textures it is likely that some craters are lost. A second reason (especially for the plains adjacent to the volcano) is that the population of smaller crater diameters below 60 m is disturbed, probably caused by continuous erosion and dust deposition. There are some outliers with diameters in the range of 450–700 m. These potentially secondary craters have been excluded from the fit.

5 Results and Discussion

The results of the dating are shown in Fig. 6. The ages show the last time when the geologic activity ended. The last activity of the low shield volcano was 45.1 Ma (CTX) or 42.4 Ma (HiRISE) before today. Therefore, the crater count of the volcano based on the CTX image is verified by the counts on the HiRISE image, which has a completely different resolution and is mapped independently. The estimated ages are very comparable with only a small difference and with overlapping error bars, although the HiRISE observation is only a subset of the unit. The uniform distribution of craters and the lack of huge craters are indicating a short emplacement time without long periods of inactivity.

The adjacent plains around the volcano show an age of 2 Ga with a small “bump” at large craters, which is steepening the plot and has been excluded. These craters have similar sizes and are located only in the western

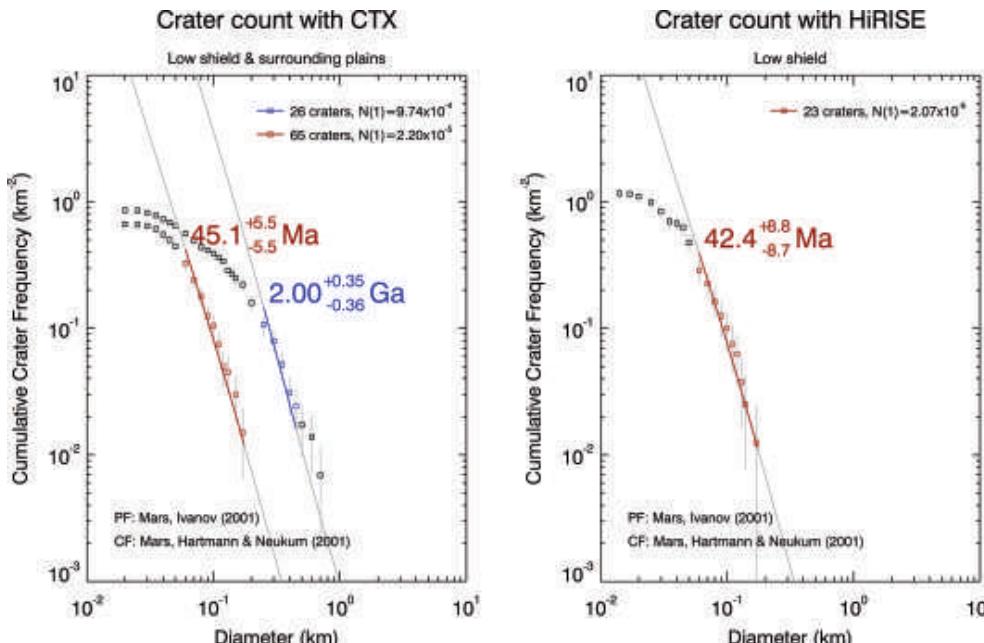


Fig. 6: Cumulative crater frequency plots with the fitted production function. The crater list is binned using pseudo-log bins. Numbers of craters used for the best fit are shown on top of the plots. We use the production function (PF) by IVANOV (2001) and the chronology function (CF) by HARTMANN & NEUKUM (2001). Left: CTX data plot for the volcanic surface (red), fitted to crater diameters >60 m, model age: 45.1 Ma. The second plot shows the surrounding plains (blue), fitted to crater diameters >250 m, model age: 2 Ga. Right: HiRISE data plot for the volcanic surface (subset), fitted to crater diameters >60 m, model age: 42.4 Ma.

part of the counting area, hence they are expected to be a few secondaries disturbing the natural crater population. However, it is only a negligible amount of secondary craters without clusters. This type of craters is discussed at length in HARTMANN (2007) and MICHAEL & NEUKUM (2010).

It is very likely that the plains buried under the volcano would show the same age. This means that the plains were formed ~2 Ga before today. After an unknown time period with continuous erosion, dust deposition (which extinguished smaller craters) and tectonic modification the shield volcano grew possibly very quickly ~45.1 Ma before today. The results indicate that this eruption was active very recently in the Martian geologic history and are in good agreement with HAUBER et al. (2011).

6 Conclusion

The age determination by crater size-frequency distributions is an established tool in planetary science to reconstruct the chronology of planetary surfaces. In this study we demonstrated a consistent relationship of the observable geologic stratigraphy and the derived ages by crater counts. This technique can produce reliable results for most surfaces. Exceptions are areas with continuous modification or intense contamination by secondary craters, which would be observable in the resulting CSFDs.

The NASA/USGS-software ISIS was used for the photogrammetric pre-processing of the planetary remote sensing data. After consideration of some aspects (e.g. spatial errors, projection issues, body definitions) the data are usable in GIS environments for mapping or determination of statistical information.

The high-resolution images of the two cameras of the *Mars Reconnaissance Orbiter* are ideally suited for the preparation of crater counts on small areas. This was not possible with mid- or low-resolution data for several decades in the past. The data of MRO made it attractive to re-investigate numerous small surfaces on Mars. It has been shown that with increasing spatial resolution more small craters can be detected, with a certain lower limit due to the effects of erosion, complex textures or burial by dust deposition.

Acknowledgements

We thank THOMAS KNEISSL and GREGORY MICHAEL (Freie Universität Berlin) for making available their software tools *CraterTools* and *Craterstats*. In addition, we thank PETR BROŽ (Academy of Sciences of the Czech Republic) and PIOTR JODŁOWSKI (Freie Universität Berlin) for their support of this study.

References

- ANDERSON, J.A., SIDES, S.C., SOLTESZ, D.L., SUCHARSKI, T.L. & BECKER, K.J., 2004: Modernization of the Integrated Software for Imagers and Spectrometers. – *Lunar and Planetary Science XXXV* (Abstract 2039), Lunar and Planetary Science Institute, Houston.
- ELIASON, E.M., 1997: Production of Digital Image Models Using the ISIS System. – *Lunar and Planetary Science XXVIII*: 331–332, Lunar and Planetary Science Institute, Houston.
- GADDIS, L.R., ANDERSON, J., BECKER, K., BECKER, T., COOK, D., EDWARDS, K., ELIASON, E., HARE, T., KIEFFER, H., LEE, E.M., MATHEWS, J., SODERBLOM, L., SUCHARSKI, T. & TORSON, J., 1997: An overview of the Integrated Software for Imaging Spectrometers (ISIS). – *Lunar and Planetary Science XXVIII*: 387–388, Lunar and Planetary Science Institute, Houston.
- GREELEY, R., 1982: The Snake River Plain, Idaho – Representative of a new category of volcanism. – *Journal of Geophysical Research* **87** (NO.B4): 2705–2712, doi:10.1029/JB087iB04p02705.
- HARTMANN, W.K. & NEUKUM, G., 2001: Cratering Chronology and the Evolution of Mars. – *Space Science Reviews* **96**: 165–194, doi:10.1023/A:1011945222010.
- HARTMANN, W.K., 2007: Martian cratering 9: Toward resolution of the controversy about small craters. – *Icarus* **189**: 274–278, doi:10.1016/j.icarus.2007.02.011.
- HAUBER, E., BLEACHER, J., GWINNER, K., WILLIAMS, D. & GREELEY, R., 2009: The topography and morphology of low shields and associated landforms of plains volcanism in the Tharsis region of Mars. – *Journal of Volcanology and Geothermal Research* **185**: 69–95, doi:10.1016/j.jvolgeores.2009.04.015.
- HAUBER, E., BROZ, P., JAGERT, F., JODŁOWSKI, P. & PLATZ, T., 2011: Very recent and wide-spread basaltic volcanism on Mars. – *Geophysical Research Letters* **38**: L10201, doi:10.1029/2011GL047310.
- IVANOV, B.A., 2001: Mars/Moon Cratering Rate Ratio Estimates. – *Space Science Reviews* **96**: 87–104, doi:10.1023/A:1011941121102.

- KNEISSL, T., VAN GASSELT, S. & NEUKUM, G., 2011: Map-projection-independent crater size-frequency determination in GIS environments – New software tool for ArcGIS. – *Planetary and Space Science* **59**: 1243–1254, doi:10.1016/j.pss.2010.03.015.
- MALIN, M.C., BELL, J.F., CANTOR, B.A., CAPLINGER, M.A., CALVIN, W.M., CLANCY, R.T., EDGETT, K.S., EDWARDS, L., HABERLE, R.M., JAMES, P.B., LEE, S.W., RAVINE, M.A., THOMAS, P.C. & WOLFF, M.J., 2007: Context Camera Investigation on board the Mars Reconnaissance Orbiter. – *Journal of Geophysical Research* **112**: E05S04, doi:10.1029/2006JE002808.
- MC EWEN, A.S., ELIASON, E.M., BERGSTROM, J.W., BRIDGES, N.T., HANSEN, C.J., DELAMERE, W.A., GRANT, J.A., GULICK, V.C., HERKENHOFF, K.E., KESZTHELYI, L., KIRK, R.L., MELLON, M.T., SQUYRES, S.W., THOMAS, N. & WEITZ, C.M., 2007: Mars Reconnaissance Orbiter's High Resolution Imaging Science Experiment (HiRISE). – *Journal of Geophysical Research* **112**: E05S02, doi:10.1029/2005JE002605.
- MICHAEL, G.G. & NEUKUM, G., 2010: Planetary surface dating from crater size-frequency distribution measurements: Partial resurfacing events and statistical age uncertainty. – *Earth and Planetary Science Letters* **294**: 223–229, doi:10.1016/j.epsl.2009.12.041.
- NEUKUM, G. & WISE, D.U., 1976: Mars – A standard crater curve and possible new time scale. – *Science* **194**: 1381–1387, doi:10.1126/science.194.4272.1381.
- NEUKUM, G., BASILEVSKY, A.T., KNEISSL, T., CHAPMAN, M.G., VAN GASSELT, S., MICHAEL, G., JAUMANN, R., HOFFMANN, H. & LANZ, J.K., 2010: The geologic evolution of Mars: Episodicity of resurfacing events and ages from cratering analysis of image data and correlation with radiometric ages of Martian meteorites. – *Earth and Planetary Science Letters* **294**: 204–222, doi:10.1016/j.epsl.2009.09.006.
- PLESCIA, J.B., 1981: The Tempe volcanic province of Mars and comparisons with the Snake River Plains of Idaho. – *Icarus* **45**: 586–601, doi:10.1016/0019-1035(81)90024-5.
- SMITH, D.E., ZUBER, M.T., FREY, H.V., GARVIN, J.B., HEAD, J.W., MUHLEMAN, D.O., PETTENGILL, G.H., PHILLIPS, R.J., SOLOMON, S.C., ZWALLY, H.J., BANNERDT, W.B., DUXBURY, T.C., GOLOMBEK, M.P., LEMOINE, F.G., NEUMANN, G.A., ROWLANDS, D.D., AHARONSON, O., FORD, P.G., IVANOV, A.B., JOHNSON, C.L., McGOVERN, P.J., ABSHIRE, J.B., AFZAL, R.S. & SUN, X., 2001: Mars Orbiter Laser Altimeter: Experiment summary after the first year of global mapping of Mars. – *Journal of Geophysical Research* **106**: NO.E10, 23,689–23,722, doi:10.1029/2000JE001364.
- WANG, J., BENNETT, K.J., SCHOLES, D.M., SLAVNEY, S., GUINNESS, E.A. & ARVIDSON, R.E., 2011: Searchable Observation Data in PDS's Orbital Data Explorer. – *Lunar and Planetary Science* **42**, Abstract 1896, Lunar and Planetary Science Institute, Houston.
- WERNER, S.C., 2009: The global martian volcanic evolutionary history. – *Icarus* **201**: 44–68, doi:10.1016/j.icarus.2008.12.019.

Addresses of the Authors:

M.Sc. Geogr. FELIX JAGERT, Geographisches Institut, Ruhr-Universität Bochum, Universitätsstr. 150, 44780 Bochum, Germany, Tel.: +49-234-9507096, e-mail: felix.jagert@rub.de

Dipl.-Geol. ERNST HAUBER, Institut für Planetenforschung, Deutsches Zentrum für Luft- u. Raumfahrt e.V. (DLR), Rutherfordstr. 2, 12489 Berlin, Germany, Tel.: +49-30-67055-325, e-mail: ernst.hauber@dlr.de

Manuskript eingereicht: Dezember 2011
Angenommen: Januar 2012

Berichte von Veranstaltungen

48. Tagung der Arbeitsgruppe „Automation in Kartographie, Photogrammetrie und GIS“ (AgA), 5.–6. September 2011, Bonn

Die diesjährige Sitzung der Arbeitsgruppe fand am Institut für Geodäsie und Geoinformation der Universität Bonn statt. Das Programm der Tagung bot eine große thematische Vielfalt an Vorträgen. Zu Beginn der zweitägigen Tagung stellte LUTZ PLUMER, stellvertretender Institutedirektor und Inhaber des Lehrstuhls Geoinformation, die aktuellen Forschungsarbeiten am Institut vor. Es folgten Präsentationen verteilt auf fünf Blöcke:

Der erste Themenblock *Datenstrukturen und Algorithmen* bot Vorträge zum Umgang mit temporärer Inkonsistenz bei Datenbanken, zur automatischen Georeferenzierung gescannter topographischer Karten, zur automatischen Abgrenzung von Baublöcken in einer topographischen Karte und zu approximativer Geometrie für vektorbasierte GIS. Die Vorträge aus dem zweiten Vortragsblock *Personalisierung und Visualisierung* beschäftigten sich mit der Visualisierung personalisierter Streckenpläne, der visuellen Analyse des Besucherverhaltens im Schweizer Nationalpark, der Untersuchung der Interaktion mit digitalen Karten zur Ableitung von Nutzergruppen und den Möglichkeiten eines „*Personal GIS*“. Den dritten Vortragsblock *Klassifikation und Interpretation* bildeten Präsentationen zur Detektion interessanter Orte und charakteristischer Muster in raumzeitlichen Trajektorien, zur Klassifikation von Gebäudegrundrissen für siedlungsstrukturelle Analysen, zum maschinellen Lernen von Gebäudetypen unter Berücksichtigung des Kontextes und zur Detektion der antarktischen Küstenlinie mit Hilfe von Snakes. Die Vielfalt der Vorträge im vierten Block *GDI, Interoperabilität und Fortführung* reichte von der Vorstellung neuer Entwicklungen für das Portal „Umweltdaten vor Ort“ über CityGML in Simulationsumgebungen und die Nutzung des ATKIS Basis-DLM für flächenstatistische Berichtssysteme bis hin zur Vorstellung des neuen Re-

visionsdienstes von swisstopo. Der letzte Themenbereich *Kartographie und Datenintegration* umfasste schließlich Vorträge zur Rolle der Kartographie im digitalen kulturellen Erbe, zu dynamischen Ontologie-Prozessen für verschiedene Detailstufen, zur automatischen Generierung von Punktwolken in Punktstreuungskarten, zur Integration von Umweltdaten in kleinmaßstäbige DLM und zur webbasierten kartographischen Visualisierung digitaler Landschaftsmodelle.

In den Pausen zwischen den Vortragsblöcken ergaben sich vielfältige Möglichkeiten, fachliche Kontakte zu knüpfen und die interessanten Themen der Veranstaltung zu diskutieren. Ergänzt wurde dies durch eine Abendveranstaltung in einem Restaurant am Bonner Rheinufer. Zum Abschluss der Tagung wurde eine Führung durch eine Ausstellung zur Geschichte der Landesvermessung in NRW in der Bezirksregierung Köln (ehemaliges Landesvermessungsamt) angeboten. Dabei wurden auch aktuelle Arbeiten und Produkte aus dem Hause vorgestellt.

Die Vorträge der Tagung sind auf der AgA-Webseite (www.ikg.uni-hannover.de/aga) veröffentlicht. Die ausgearbeiteten Beiträge werden in einem Band der „*Mitteilungen des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie*“ abgedruckt. Die nächste Sitzung der AgA wird am 10. und 11. September 2012 voraussichtlich in Rostock stattfinden.

ANNETTE HEY, Rostock

Workshop „Neue Methoden für die Auswertung und Interpretation von Fernerkundungsdaten“, 26. Oktober 2011, Halle

Der Arbeitskreis „*Auswertung von Fernerkundungsdaten*“ führte auch im vergangenen Jahr 2011 seine Tradition eines thematischen Workshops zwischen den Jahrestagungen der Gesellschaft fort und traf sich diesmal am 26. Oktober am Institut für Geowissenschaften

und Geographie der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg.

Der thematische Schwerpunkt lag diesmal auf neuen und innovativen Verfahren und Ansätzen für die Bearbeitung und Auswertung von Fernerkundungsbilddaten. Nach einer kurzen Begrüßung und Einführung standen in den ersten Vorträgen die Methoden Conditional Random Fields, die Support Vector Machines (SVM) und das Data Mining im Vordergrund. Der zweite Vortragsblock beleuchtete dagegen schwerpunktmäßig verschiedene Change Detection Verfahren. Die geometrische Validierung von Landnutzungsobjekten und die Kernel-Composition als Methode der Datenfusion in der SVM Klassifizierung waren weitere spannende Themen des Workshops. Neben den acht Vorträgen bot die Veranstaltung – ganz im Sinne eines Workshops – ausreichend Zeit für ausführlichere und interessante Diskussionen.

Insgesamt nahmen mehr als 30 interessierte Fachkolleginnen und -kollegen diese Gelegenheit wahr und beteiligten sich als Vortragende oder Teilnehmer an unserem Workshop. Die auf dem Workshop gehaltenen Vorträge können über den Link <http://www.dgpf.de/neu/dgpf/interpretation.htm> als PDF-Dateien heruntergeladen werden.

HORST WEICHELT, Potsdam, und
BIRGIT KLEINSCHMIT, Berlin

Workshop „3D Stadtmodelle“, 8.–9. November 2011, Bonn

Auf dem dritten Workshop der gemeinsamen Kommission der Deutschen Gesellschaft für Kartographie (DGfK) und der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation (DGPF) ist es dem Veranstalter abermals gelungen, zum Thema „3D-Stadtmodelle“ ca. 90 Teilnehmer aus Hochschulen, Firmen und Verwaltung zu gewinnen. Entsprechend dem Teilnehmerkreis waren die Vorträge der zweitägigen Veranstaltung bunt gemischt und reichten von der Datenmodellierung und der Datenverarbeitung bis hin zu Präsentationen über aktuelle Anwendungen aus dem In- und Ausland.

Aus dem Bereich der Wissenschaft berichtete JÜRGEN DÖLLNER vom Hasso Plattner Institut, Universität Potsdam, über Methoden zur Analyse und Visualisierung sowie zur semantischen Klassifizierung großer dreidimensionaler Punktwolken, die räumlich unregelmäßig verteilt sind und keinerlei Sachinformationen enthalten. Diese Punktwolken können beispielsweise durch echtzeitfähige, bildbasierte, permanente Erfassung und Ableitung generiert worden sein. DÖLLNER zeigte auf, wie auf der Basis von Punktwolken-Charakteristiken semantischer Information durch eine schrittweise Identifikation Vegetationsbereiche und Bodenpunkte abgeleitet werden können. Semantische Informationen ließen sich neben der Erstellung von statischen oder „real-time“ 3D-Stadtmodellen ferner für Straßendaten und für Bewegungsanalysen nutzen. Die Attributierung der einzelnen Punkte mit semantischer Information dient dabei dazu, die Analyse- und Prozessierungsrechnungen großer Punktwolken zu optimieren bzw. zu präzisieren. Zudem unterstützt sie wirkungsvoll 3D-Renderingverfahren.

CLAUS NAGEL von der Technischen Universität Berlin berichtete über die Kopplung von 3D-Stadtmodellen mit Cloud-Diensten, um bestehende internetbasierte 3D-Stadtmodelle weiteren Nutzungen zuzuführen. In der Cloud sollen die bestehenden 3D-Modelle kollaborativ um weitere anwendungs- und nutzungsspezifische Informationen in einem eigenständigen Visualisierungsmodell angereichert werden, ohne aber das zugrunde liegende 3D-Stadtmodell zu ändern. Am Beispiel von Berlin konnte über Cloud-Dienste das 3D-Stadtmodell mit anwendungsbezogenen Informationen gemeinschaftlich verknüpft und modifiziert werden. Die Informationen ließen sich durch Anklicken im 3D-Stadtmodell abrufen, ohne die Integrität des Originalmodells zu gefährden.

URSULA EICKER von der Hochschule für Technik in Stuttgart präsentierte mit ihrem Beitrag über die Erstellung stadtweiter Wärmebedarfsprognosen auf Basis von 3D-Stadtmodellen anwendungsbezogene Projekte aus dem Energiebereich mit dem Schwerpunkt der Energieeffizienz. Ziel sei es, die Nutzungseffizienz von Gebäuden im städtischen Raum zu steigern und den Einsatz der erneu-

erbaren Energie zu erhöhen. Problematisch seien nicht die Neubauten, sondern die Sanierungen des Altbestandes. Sie wies auch darauf hin, dass ein starker Strukturwandel erforderlich sei, um den Anteil der netzgebundenen Wärmeversorgung in den Fern- und Nahwärmesetzungen zu erhöhen. Geoinformationssysteme können dabei helfen, den örtlichen Verbrauch oder den Energiebedarf darzustellen, Simulationsrechnungen durchzuführen oder Szenarien für die Sanierung darzustellen. Auf methodischer Seite kommen dabei ein Datenmanagement auf der Basis von CityGML als 3D-Tool und verschiedene Simulationsumgebungen für Gebäude und erneuerbare Energiesysteme zum Einsatz. Anhand verschiedener Fallbeispiele, wie der Photovoltaik-Potentialanalyse, wurde gezeigt, dass der Wärmebedarf von Stadtquartieren mit guter Genauigkeit mittels 3D-Stadtmodellen berechnet werden kann. Zusätzliche Sachinformationen wie Gebäudealter oder Nutzung seien jedoch erforderlich, um gute Ergebnisse zu erzielen. 3D-Datenmodelle würden, so EICKER, zukünftig Grundlage für Smart City Konzepte sein, um den Energieverbrauch bzw. die Energieerzeugung, das Lastmanagement oder Energieströme zu visualisieren.

Aus dem Umfeld der Standards und Normen berichtet GERHARD GRÖGER von der Universität Bonn, dass es auch im Rahmen der Umsetzung der INSPIRE-Richtlinie (Infrastructure for Spatial Information in the European Community) notwendig sei, bereits verfügbare 2,5D- bzw. 3D-Gebäudemodelle auf europäischer bzw. nationaler Ebene interoperabel bereitzustellen. Die INSPIRE-Richtlinie verpflichtet Behörden aller Verwaltungsebenen, ihre Geodaten über Geodateninfrastrukturen öffentlich verfügbar bereitzustellen. Um dieser Anforderung gerecht zu werden, hat sich eine thematische Arbeitsgruppe „Buildings“ gebildet. Aus einer Analyse von Anwendungsfällen hat diese Gruppe Nutzeranforderungen abgeleitet, aus denen unterschiedliche Profile entwickelt wurden, die sich in der geometrischen und semantischen Ausprägung unterscheiden. Zur Umsetzung der unter CityGML-Gesichtspunkten erstellten Gebäudeprofile sind zwei Profile verbindlich vorgeschrrieben. Diese beiden normativen Profile des INSPIRE-Gebäudemodells sind ge-

trennt für 2D- bzw. 2,5D-Gebäudeinformationen und 3D-Gebäudemodelle im Detaillierungsgrad eines Klötzenmodells entwickelt worden und die Datenspezifikationen in der aktuellen Version 2.0 befinden sich in der Kommentierungsphase.

BENJAMIN HAGEDORN, ebenfalls von der Universität Potsdam, machte deutlich, dass das Thema 3D ein Querschnittsthema in vielen Arbeitskreisen des Open Geospatial Consortiums (OGC) ist. Eine der OGC-Arbeitsgruppen befasst sich mit dem 3D-Informationsmanagement (3DIM) zur Verbesserung der Interoperabilität in Zusammenarbeit mit weiteren Organisationen, wie dem W3C. Im Umfeld der dienstbasierten 3D-Darstellung – dem Service-based 3D Portrayal – werden verschiedene internetbasierte Dienste, wie der WFS, eingesetzt, die wiederum verschiedene internetbasierte Sprachen und Formate wie CityGML nutzen. Trotz der vielen Standards benötigt der Anwender, so HAGEDORNS Credo, eine Art 3D MapServer, der dreidimensionale Informationen am Server (beispielsweise via dem Web View Service -WVS) oder am Client (via dem Web 3D Service -W3DS) nutzergerecht aufbereitet. Derzeit werden über ein experimentelles Projekt die Schranken bei der Integration und Visualisierung von 3D-Daten untersucht. Auf die weiteren Ergebnisse dürfen wir gespannt sein.

Der Sprecher der SIG3D, EGBERT CASPER von der Fa. Zerna-Ingenieure GmbH, erläuterte den notwendigen Bedarf eines Modellierungshandbuches zur Qualitätssicherung von 3D-Stadtmodellen. Ziel sei es, Qualität als Grundlage für eine nachhaltige Fortführung und verlässliche Randbedingungen für die Modellierung und Entwicklung sicherzustellen. Das Modellierungshandbuch umfasst Regeln und Modellierungs-Empfehlungen von 3D-Stadtmodell-Objekten in CityGML, um zur Harmonisierung von Geodaten beizutragen. Das Qualitätskonzept der ehrenamtlich tätigen Arbeitsgruppe „Qualität“ der SIG3D umfasst ferner Definitionen, Erläuterungen, Hinweise und Beispiele zu Prüfverfahren, zur Zertifizierung, zur Leistungsbeschreibung und Fortführung von 3D-Stadtmodellen.

MICHEL KRÄMER vom Fraunhofer-Institut für Graphische Datenverarbeitung berichtete über neue Technologien des Trendthemas 3D,

das insbesondere durch die immer leistungsfähigeren 3D-Spiele und dem anwachsenden Angebot an 3D-Software sich immer stärker in Richtung der Web-Anwendung entwickelt. Auch die dabei eingesetzten Technologien sind ständig im Fluss. So wurde das plattformunabhängige OpenGL fortentwickelt zu WebGL als neue Internettechnologie, die auf die weniger mächtige Programmierschnittstelle (Low-Level-API) von OpenGL zugreift. Mit X3DOM-JavaScript lassen sich 3D-Szenen web-basiert in HTML5 visualisieren. Wie in verschiedenen Beispielen gezeigt, ermöglicht diese Technologie die Visualisierungen in den WebGL-fähigen Internet-Browsern Firefox, Chrome und Safari. Auch große Datenmengen, z. B. von einer Million 3D-Polygone, werden in Sekunden visualisiert. Unter der Voraussetzung, dass das Plug-In „Flash“ installiert ist, kann X3DOM auch in Verbindung mit X3D, WebGL und Flash 11 genutzt werden. Ferner lassen sich in Datenbanken gespeicherte 3D-Stadtmodelle über einen vom Fraunhofer-Institut entwickelten CityServer3D mit X3D-Schnittstelle und einem X3DOM CityViewer web-basiert und online visualisieren, die sich zukünftig auf Smart-Phones nutzen lassen.

Aus der Gruppe der behördlichen Erzeuger und Anbieter von 3D-Stadtmodellen präsentierte SVEN BALTRUSCH vom Amt für Geoinformation, Vermessungs- und Katasterwesen in Mecklenburg-Vorpommern die halbautomatisierte Produktion des landesweiten 3D-Gebäudemodells. Erfassungsgrundlage ist ein Beschluss der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV), 3D-Gebäudemodelle in verschiedenen Ausbaustufen bundesweit bereitzustellen. Die Vermessungsverwaltungen der Länder führen im Liegenschaftskataster alle Gebäudegrundrisse, so dass es eine optimale Produktionsgrundlage für 3D-Stadtmodelle bildet. Die Bereitstellung und Führung der Gebäudemodelle in den beiden Detaillierungsstufen LoD1 und LoD2 erfolgt derzeit im Rahmen des AdV-CityGML-Projekts und später direkt im AAA-Modell. Entsprechend des AdV-Beschlusses ist die grundrissstreue Darstellung von 3D-Gebäudemodellen gegenüber dem Grundriss aus dem Liegenschaftskataster nicht zwun-

gend vorgeschrieben. Die Fortführung des 3D-Gebäudemodells von Mecklenburg-Vorpommern ist im Rahmen der Fortführung des Liegenschaftskatasters und der photogrammetrischen Neubefliegung möglich. BALTRUSCH zeigte auf, dass die Dachrekonstruktion teilautomatisiert im Batch-Prozess unter Verwendung von Daten aus Airborne Laserscanning (ALS) oder aus den durch Bildkorrelation gewonnenen Digitalen Oberflächenmodellen (DOM) möglich ist. Eine Analyse der unter Verwendung verschiedener Oberflächen-datenquellen erzielten Ergebnisse zeigte, dass im bebauten Bereich ALS-Daten deutlich bessere Ergebnisse liefern können gegenüber dem aus Bildkorrelation von Stereoluftbildern abgeleiteten DOM. Wenn die Punktdichte der ALS-Daten allerdings sehr gering war, dann waren die Ergebnisse aus der Korrelation stets besser.

Ferner wurde das 3D-Stadtmodell der Stadt Neuss von MARTIN STITZ vorgestellt. Die Stadt Neuss hatte höhere Anforderungen an die Genauigkeiten des bereits durch die Landesvermessung zur Verfügung gestellten Gebäude-modells im LoD1 sowie an die Verfügbarkeit und an die Punktdichte der ALS-Daten. Daher entschied sich die Stadt Neuss für eine photogrammetrische Erfassung, bei der die Gebäudegrundrisse aus dem Liegenschaftskataster (der ALK) angehalten und Dachüberstände erhalten werden sollten. Die Fortführung der 3D-Gebäudemodelle erfolgt über ein Verfahren zur Abgabe von Differenzdaten. Die Stadt Linz in Österreich konnte sich mit einem interaktiven 3D-Stadtmodell mit den unterschiedlichen Themenschwerpunkten wie Population, Freizeit und Kultur und Social Services präsentieren, das für jedermann im Rathaus zugänglich ist. Die Themen, so Frau ELKE ACHLEITNER, werden jeweils graphisch aufbereitet und lassen sich über einen Touch-Screen und eine 3D-Maus zur Navigation steuern. Neben den vielen Sachinformationen ist das Highlight das 3D-Gebäudemodell, das mit einer sehr hohen Genauigkeit photogrammetrisch ausgewertet und durch terrestrische Messungen sowie umfangreiche Texturen ergänzt wurde. Der Detaillierungsgrad des Linzer-Stadtmodells geht fast schon über LoD3 hinaus, konnte allerdings nur für einen Teil der Innenstadt von Linz modelliert werden.

Aus dem Bereich Software- und Produktentwicklung stellte CHRISTIAN DAHMEN von der Fa. con terra GmbH Möglichkeiten zur Verarbeitung und zum Austausch von 3D-Daten vor, wobei zur Verarbeitung von 3D-Punktwolken die Software FME (Feature Manipulation Engine) als Geodatendrehscheibe für eine Vielzahl von Datenformaten wie das LAS-Format, und Datenstrukturen wie CityGML eingesetzt werden kann. Vor dem Hintergrund eines automatisierten GIS-Prozesses ist die Software ein über Schnittstellen und Funktionen erweiterbarer Geodatenprozessor, der auch zur Datenmodellierung verwendet werden kann. Sie kann aber auch für die Datentransformationen, die Verknüpfung von Geometrie mit Sachdaten sowie zur Texturierung von Oberflächen und die Attributierung geometrischer Objekte sowie zur Ableitung von Blockmodellen (im LoDI) verwendet werden, wie am Beispiel von Karlsruhe gezeigt. Projektbezogen wird die Entwicklung von Methoden und Prüfalgorithmen zur Softwareimplementierung auf Basis von FME vorangetrieben.

MARTIN KRÜCKHANS von der Fa. CPA Systems GmbH präsentierte SEDRIS als Standard zur Modellierung von synthetischen 3D-Umweltdaten. SEDRIS (Synthetic Environment Data Representation and Interchange Specification) hat sich aus der im Jahr 1994 entwickelten Norm der ISO/IEC entwickelt und ist eine Kombination von Normen zur Beschreibung, Interaktion und zum Austausch von Umweltdaten. Die Community von SEDRIS setzt sich aus einem vielfältigen Kreis namhafter Firmen wie Boeing, EADS, Rheinmetall Defence, Thales etc. zusammen. Mit SEDRIS können Strukturen, die Syntax und die Semantik der Umweltdaten betriebssystemunabhängig als objektorientiertes Klassenmodell modelliert und in CityGML-Strukturen abgebildet werden. ANDREAS STEFFENS von der Fa. 3DIS GmbH widmete sich der netzwerkbasierten Aufbereitung, Verarbeitung und Darstellung großer 3D-Stadtmodelle, die stets ein so genanntes Streaming erfordern, um sie performant und sicher auch auf mobilen Endgeräten einsetzen zu können. Um streamingfähige 3D-Stadtmodelle zu erhalten, müssen diese entsprechend aufbereitet werden. Liegen diese 3D-Stadtmodelle in dem

XML-basierten Format CityGML vor, so ist eine Konvertierung zur Visualisierung dieser XML-Daten in ein Grafikkarten-freundliches Datenformat notwendig. Bei der Konvertierung werden die Geometrieelemente über räumliche Kachelungen und Triangulierungen zusammengefasst und Texturen in Texturatlanten sortiert, so dass eine beschleunigte Verarbeitung durch die Grafikkarte ermöglicht wird. Die Streaming-Dateien werden in einem nicht spezifizierten Binärformat mit zusätzlicher Verschlüsselung erzeugt.

HANS GREGERS PETERSEN stellte ein Projekt der Fa. BLOM zur Erfassung und Unterstützung von Maßnahmen zur Gebäudesanierung privater Bauherren auf der Basis von Thermalbildern vor. Das Projekt soll helfen, das Ziel einer 50%igen Reduzierung der CO₂ Emissionen im Jahr 2025 bzw. eine CO₂ neutrale Emission bis 2050 zu erreichen. Nach einem kurzen theoretischen Abriss erläuterte PETERSEN Rahmenbedingungen der Befliegung und der Datenprozessierung. Endprodukte sind kolorierte Orthophotos, maskierte GebäudeLayer und statistische Auswertungen. Die projektbezogenen Ergebnisse zeigen, dass die in internetbasierten Geoinformationssystemen prozessierten und visualisierten Thermalbilder in idealer Weise Investitionsentscheidungen unterstützen und ein guter Beitrag zur Erreichung der ambitionierten Klimaziele sind.

CHRISTOPH AVERDUNG von der Fa. CPA Systems GmbH widmete sich der Frage, wie 3D-Stadtmodelle genutzt werden können, um komplexe Sachverhalte aus den verschiedensten Anwendungsbereichen, wie der Architektur, dem Bauwesen oder der Immobilienwirtschaft zu unterstützen, so dass Daten unter Einhaltung der Urheberrechte und unter Berücksichtigung IT-relevanter Rahmenbedingungen präsentiert und ausgetauscht werden können. Ein möglicher Lösungsansatz, so AVERDUNG, sei die gemeinschaftliche Nutzung einer Internet-Plattform „3D-CityVision“ als Kommunikationsplattform für Datenanbieter und Datennutzer. Dabei ließen sich Wertschöpfungsketten bilden, ohne umfangreiche eigene IT-Kenntnisse bei den Datenanbietern aufzubauen zu müssen. Notwendig sei die Optimierung des webbasierten OGC-konformen Zugriffs auf die Geodaten im Sinne eines

OGC-Service-Providing, der ein Abrechnungsverfahren – beispielsweise über PayPal – ermöglicht, eine Authentifizierung unterstützt und die Datenanbieter und Datennachfragenden über ein zentrales Informationsportal zusammenbringt.

ROBERT MAYSTER von der Fa. Navigon erläuterte die Anforderungen an die Darstellung von 3D-Stadtmodellen für Geräte im mobilen Einsatz, wie solchen der Fa. Navigon. Zukünftig werden sich mobile Anwendungen nicht auf die Navigation in Autos beschränken, sondern auf die Nutzergruppe der Fußgänger erweitert werden, z. B. im freien Gelände oder in Gebäuden. Im mobilen Einsatz ergeben sich bei der 3D-Visualisierung von Stadtmodellen derzeit Probleme aufgrund der Verdeckung der Route durch die Gebäude und durch höhere Ladezeiten. Lösungsansätze sind neben der transparenten Darstellung derjenigen Gebäude, die die Route verdecken, die isometrische Darstellung anstelle einer perspektivischen Präsentation, um die Footprints der Gebäude zu erhalten, sowie die Darstellung der Fahrlinie als Wand. Texturen seien aus Sicht der Anwender zur Orientierung notwendig. Texturierte Landmarks müssen ferner lagerichtig positioniert werden.

In einer sehr anschaulichen Weise zeigten ULF TELLER von der Fa. 3D-Druck und THOMAS MAIR von der Fa. APV Ingenieurgesellschaft mbH, wie aus digitalen Gebäude- und Stadtmodellen physische Modelle aus den verschiedensten Werkstoffen produziert werden können. Diese physischen Modelle lassen sich in idealer Weise insbesondere im Rahmen der Bürgerbeteiligung bei umstrittenen Bauprojekten als Anschauungs- und Präsentationsobjekte verwenden. Sie unterstützen zugleich die Entscheidungsprozesse, um bauliche Veränderungen kostengünstig darzustellen. Als Datengrundlage werden vielfach amtliche Geobasisdaten genutzt, wie Daten aus dem Airborne Laserscanning, Luftbilder, Flurkarten und das DGM sowie 3D-Gebäudemodelle, die bei höheren Detaillierungen um terrestriische Vermessungen ergänzt werden. Die Produktion physischer Modelle ist eine klassische Methode aus der CAD-Konstruktion und wird auch in der Architektursoftware genutzt. Trotz einiger Probleme bei der korrekten Datentransformation von 3D-Gebäudemodellen



Diskussion am Rande des Workshops 3D Stadtmodelle.

in die CAD-Welt zeigte sich, dass 3D-Drucke innovative Lösungen sind, die auch den Druck voll texturierter Modelle ermöglichen. Was bereits problemlos und automatisiert im Maschinenbau funktioniert, sollte auch im Geobereich eingesetzt werden – mit möglichst geringem manuellem Einsatz.

Weitere Informationen zu diesem Workshop und dem Arbeitskreis sind auf der Homepage www.3d-stadtmodelle.org erhältlich.

ROBERT ROSCHLAUB, München

D-NordOst: 14. Anwendungsbezogener Workshop zur Erfassung, Modellierung, Verarbeitung und Auswertung von 3D-Daten, 8.–9. Dezember 2011, Berlin

Am 8. und 9. Dezember 2011 trafen sich in Berlin in den Räumlichkeiten der Gesellschaft zur Förderung angewandter Informatik e.V. (GFI) in Adlershof etwa 70 Interessierte, um sich über verschiedene anwendungsbezogene Themen auszutauschen. Ergänzt wurde dies durch eine „special session“ *3D Object Recognition and Tracking* am zweiten Workshoptag. Die Organisation der Veranstaltung lag in den Händen von MICHAEL POCHANKE von der GFI. Die überwiegende Anzahl der Workshop-Beiträge wurde von Einrichtungen aus Berlin wie z. B. GFI oder DLR eingereicht. Weitere Beiträge wurden von Institutionen aus Dresden, Braunschweig, Wismar, Hamburg und Bremen gesandt.

Der erste Workshoptag bestand aus Vortragsblöcken zu den Themen „Algorithmen/Grundlagen“, „Messverfahren/Sensoren“ sowie „Visualisierung/VR“. So stellte z.B. CHRISTIAN KECK (TU Braunschweig) ein Verfahren zur Qualitätsbeurteilung von „Phasenrauschen bei Messungen mit strukturierter Beleuchtung“ vor. Im zweiten Themenbereich informierte ANDY MEYER über ein von der GFaI entwickeltes mobiles Laserscanningsystem, das zur schnellen 3D-Modellgenerierung von Gebäude-Innenräumen genutzt werden kann. Ebenso führte SEBASTIAN VETTER der Fa. fokus GmbH die „Automatisierte 3D-Objekt-dokumentation auf der Grundlage eines Bildverbandedes“ am Beispiel der Burg Katzenstein (Baden-Württemberg) vor. Im letzten Themenblock zeigte HERBERT LITSCHKE von der Hochschule Wismar den Workshopteilnehmern die Visualisierung einer Modellanordnung der experimentellen Strömungsmechanik: Das Taylor-Couette-System – ein mit Flüssigkeit gefüllter Spalt zwischen zwei gegensätzlich rotierenden Zylindern. Des Weiteren berichtete THOMAS JUNG (HTW Berlin) über den Einsatz des Kinect-Sensors von Microsoft zur betrachterabhängigen Darstellung einer 3D-Welt.

Der zweite Workshoptag war geprägt von Vorträgen zum Thema „Anwendungen für den Menschen in der Humanmedizin“ sowie einer „special session“ „3D Object Recognition and Tracking“, für die ein eigener „Call for Paper“

initiiert wurde. Der erste Vortragsblock enthielt u.a. einen Vortrag von STEFAN HOLTZHAUSEN von der TU Dresden über die Vermessung von Wunden bzw. des Wundrandes mit Hilfe eines handgeführten Streifenprojektionssystems. Die „special session“ umfasste schließlich Vorträge zu verschiedenen kamerasierten Auswerteverfahren. So zeigte EUGEN FUNK (DLR Berlin) ein bildbasiertes 3D-Rekonstruktionverfahren durch Segmentierung. NIKLAS TREUTNER (HU Berlin) entwickelte einen Personentracker, der auf Bildern aus mehreren unabhängigen Webcams basiert. JENS LAMBRECHT (TU Berlin) gab einen Überblick über verschiedene Anwendungen der Mensch-Roboter-Kommunikation auf Basis von 3D-Motion-Tracking. HENDRIK THAMER (Universität Bremen) stellte ein experimentelles Verfahren auf Grundlage von Time-of-Flight Kamerabildern, bzw. mehreren synthetischen Bildern vor, um das automatisierte Entpacken von Containern zu unterstützen. Der abschließende Vortrag von MATTHIAS HINTZMANN (GFaI) befasste sich mit der Erkennung und Verfolgung von Fluchtpunkten in Bildern. Diese besitzen in der 3D-Bildverarbeitung vielfältige Anwendung.

Schließlich bleibt zu erwähnen, dass zwischen den Vortragsblöcken sowie am Abend des ersten Vortragstages bei einem „Come together“ genug Zeit und Gelegenheit für den fachlichen Austausch und das Knüpfen neuer Kontakte blieb.

ANNA MARIA MEYER, Oldenburg

Hochschulnachrichten

Karlsruher Institut für Technologie:

Herr Dipl.-Ing. ANDREAS SCHMITT wurde am 20.12.2011 von der Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) mit der am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt in Oberpfaffenhofen angefertigten Arbeit „Änderungserkennung in multitemporalen und multipolarisierten Radaraufnahmen“ zum Dr.-Ing. promoviert. Referent: Prof. Dr.-Ing. STEFAN HINZ, KIT; Koreferenten: Prof. Dr. IRENA HAJNEK, ETH Zürich / DLR, Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. HANS-PETER BAHR, KIT.

Kurzfassung:

Die Auswertung von Zeitreihen satellitengetragener Synthetik Apertur Radar (SAR) Sensoren erfordert schon aufgrund der sehr großen Datenmenge ein hohes Maß an Automation. Während die geometrische Zusammenführung der einzelnen Aufnahmen in geokodierten Standardprodukten – bei genauer Kenntnis der Flugbahn und evtl. Hinzunahme eines Höhenmodells – in der Regel ausreichend gegeben ist, stellen die radiometrischen Eigenschaften von SAR-Bildern mit ihrer Kombination aus additiven und multiplikativen Rauschanteilen große Anforderungen an die verwendeten Auswertealgorithmen. Ziel der Arbeit ist es, kontinuierliche Änderungen in der Rückstreuung vollautomatisch zu erfassen und – soweit möglich – zu interpretieren. Dafür werden mehrfach polarisierte Aufnahmen eingesetzt, die eine Charakterisierung des zugrundeliegenden Streumechanismus erlauben.

In einem ersten Schritt werden Standardbildprodukte – geokodierte Amplitudenbilder bzw. Parameter polarimetrischer Zerlegungen – als Datengrundlage herangezogen. Bei der Bildbearbeitung kommen alternative Bilddarstellungen zum Einsatz, die das Bild nicht als Teppich unabhängiger Pixel, sondern als Summe sich überlagernder Strukturfunktionen auffassen. Da jede Struktur im Bild nun durch den dazugehörigen Koeffizienten beschrieben wird, kann mithilfe der Koeffizien-

tenstatistik zwischen für den Bildinhalt wichtigen und unwichtigen Koeffizienten – und somit Strukturen – unterschieden werden. Um Artefakte im Ergebnisbild zu vermeiden, wird eine adaptive Gewichtungsfunktion eingeführt, die einen bis zur zweiten Ableitung stetigen Übergang zwischen entfernten und unverändert übernommenen Koeffizienten garantiert. Neben der Verbesserung von Einzelbildern kann das Vergleichsbild anstatt pixelbasiert auch im Koeffizientenraum berechnet und anschließend auf die signifikanten Strukturen beschränkt werden. Aus der Vielzahl alternativer Bilddarstellungen hat sich vor allem für die Bearbeitung feinstrukturierter Bereiche – im Allgemeinen urbane Gebiete – die Curvelet-Transformation als adäquate Methode herausgestellt.

Da der Curvelet-basierten SAR-Bildverarbeitung in der Regel bereits zahlreiche, teilweise sehr approximierende Prozessierungsschritte vorgeschaltet sind, wird im zweiten Schritt das lediglich fokussierte Single-Look-Bild als Datengrundlage herangezogen und die folgende Prozessierungskette zum geokodierten Produkt neu aufgebaut. Damit sämtliche Aufnahmen unabhängig von ihrem Aufnahmemodus bzw. ihrem Polarisationsgehalt gleichermaßen verarbeitet werden können, wird auf die normierte Kennaugh-Matrix als mathematische Streubeschreibung zurückgegriffen. Die Gesamtintensität kann bezogen auf die Referenzintensität 1 mithilfe der Tangens-Hyperbolicus-Skalierung auf einen einheitlichen Wertebereich normiert werden, während die polarimetrische Information bereits als normierte Intensitätsdifferenz im gleichen Wertebereich vorliegt. Wird nun statt der konstanten Referenzintensität 1 eine weitere Aufnahme eingesetzt, ergibt sich die differentielle Kennaugh-Matrix aus den relativen Änderungen der Rückstreustärke sowie aller vorhandenen polarimetrischen Kanäle. Zur radiometrischen Verbesserung der Kennaugh-Matrix wird in Anlehnung an die alternativen Bilddarstellungen das pyramidale Multilooking entwickelt, welches innerhalb einer Bildpyramide für jede Auflösungszelle zwischen

radiometrischer Genauigkeit und geometrischer Auflösung abwägt, um so den optimalen Lookfaktor zu ermitteln. Die statistische Grundlage hierfür liefert ein neues Störungsmodell für SAR-Daten, aus dem durch analytische Vereinfachung exemplarisch zwei stochastische Modellierungen des Rauschanteils – nach der Student- bzw. Chi-Quadrat-Verteilung – abgeleitet werden. Die vorgeschlagene Normierung von Einzelaufnahmen sowie Vergleichsbildern ermöglicht die platzsparende und informationserhaltende Speicherung als ganzzahlige Werte, liefert gleichzeitig bei Reduktion der Bit-Tiefe ein sogenanntes Quick-look-Bild und kann dennoch zur visuellen Darstellung in jede beliebige Einheit skaliert werden.

Den Abschluss bildet eine sehr breit angelegte Demonstration des Potentials der entwickelten Verfahren in drei Themenschwerpunkten. Für den Bereich „*Naturkatastrophen und Katastrophenhilfe*“ werden stellvertretend Gebäudeschäden, Hangrutschungen und ein Vulkanausbruch beobachtet. Anwendungen in der „*Land- und Forstwirtschaft*“ sind durch die Überwachung von Pflanzenwuchs mit und ohne künstliche Bewässerung, die Kontrolle von Wasserreservoirs und die Kartierung von Windwurfflächen repräsentiert. Im Bereich „*Ökologie und Klimawandel*“ stehen die Klassifikation subpolärer Küstenlinien, die Kartierung von temporären Überflutungsflächen und möglichen Habitaten sowie die jahreszeitliche Entwicklung von Grünland im Fokus. Zusätzlich zur qualitativen Validierung am Beispiel praktischer Anwendungen wird eine quantitative Validierung der erkannten Änderungen aus dem Curvelet-basierten Verfahren und der differentiellen Kennaugh-Matrix anhand manuell erzeugter Referenzdaten durchgeführt. Im Vergleich zu fünf erfahrenen SAR-Interpreten haben beide Verfahren nicht nur in Geschwindigkeit und radiometrischer Auflösung, sondern auch in ihrer Eindeutigkeit und Robustheit überzeugt.

Leibniz Universität Hannover

Herr DIPL.-ING. JAN DIRK WEGNER wurde am 02.08.2011 an der Fakultät für Bauingenieur-

wesen und Geodäsie der Leibniz Universität Hannover mit der Arbeit „*Detection and height estimation of buildings from SAR and optical images using conditional random fields*“ zum Dr.-Ing. promoviert.

Referent: Prof. Dr.-Ing. UWE SÖRGEL, Leibniz Universität Hannover, Koreferenten: Prof. Dr.-Ing. habil. MONIKA SESTER, Leibniz Universität Hannover, Prof. Dr.-Ing. UWE STILLA, Technische Universität München.

Kurzfassung:

In sehr hoch aufgelösten SAR-Daten (Radar mit synthetischer Apertur) können einzelne städtische Gebäude erkannt werden. Geometrische Effekte und schmales Signalspektrum erschweren jedoch die automatisierte Datenanalyse. Komplementäre Informationen aus multispektralen optischen Fernerkundungsbildern können die Objektdetektion entscheidend verbessern. Bedingt durch dreidimensionale Effekte, insbesondere in städtischen Gebieten, können SAR-Daten und optische Bilder allerdings nicht direkt pixel-basiert fusioniert werden. Deshalb wird in der Dissertation eine kombinierte Auswertung beider Datentypern auf Merkmals-Ebene durchgeführt.

Genügen direkte Merkmale nicht zur Objektdetektion, kann Kontextwissen diese entscheidend verbessern. So ist ein Gebäude in den Daten nicht nur durch Dachfarbe und Rechtwinkligkeit beschrieben, sondern zusätzlich z. B. durch den Sonnenschatten oder eine Zuwegung. Aktuelle Ansätze basieren häufig auf einer großen Anzahl Regeln, deren Parameter für jede Szene manuell eingestellt werden. Die Entwicklung neuer kontext-basierter probabilistischer Ansätze, die ihre Parameter auf Grundlage von Trainingsdaten erlernen, ermöglicht eine automatische Anpassung an neue Szenen.

Nach der erfolgreichen Detektion von Gebäuden kann es für eine Vielzahl von Anwendungen, z. B. während einer Flutkatastrophe, wünschenswert sein, eine Höhe pro Gebäude zu schätzen. Aktuelle Ansätze nutzen oft nur einzelne Möglichkeiten zur Höhenmessung. Zudem sind diese in der Regel nicht stochastisch interpretierbar, essentielle Aussagen zu Genauigkeit und Zuverlässigkeit können nicht getroffen werden.

Die Dissertation behandelt vier wesentliche Aspekte:

- 1) Die Extraktion von *Gebäudemarkmalen in SAR-Daten und optischen Bildern*,
- 2) neue Ansätze zur *probabilistischen Formulierung von urbanem Szenenkontext*,
- 3) innovative Methoden der *Höhenbestimmung von Gebäuden mittels Kombination eines SAR-Datensatzes und eines optischen Bildes*,
- 4) einen *stochastisch strengen Ansatz zur Schätzung einer einzigen Höhe pro Gebäude* aus mehreren gemessenen, verbunden mit einer *Genauigkeitsaussage* zu dieser Höhe.

Neue Möglichkeiten der Formulierung von Kontextwissen basierend auf Conditional Random Fields (CRF) werden eingeführt. Unregelmäßige Graphstrukturen von Bildregionen, die die Szenentopologie repräsentieren, ersetzen Gitter quadratischer Bildteilstücke. Diese Graphen vereinfachen ein umfassendes Erlernen von Objektkontext und die anschließende Objektdetektion. Des Weiteren wird ein Ansatz zum Erlernen von Kontext bei nur teilweise semantisch belegten Trainingsdaten eingeführt. Neue Möglichkeiten der Bestimmung von Gebäudehöhen werden beschrieben und ein Gauß-Helmert-Modell eingeführt, das alle Messungen pro Gebäude ausgleicht und mit einer Standardabweichung versieht.

Experimente mit einem SAR-Datensatz und einem optischen Bild lassen sowohl Vorteile als auch Einschränkungen der vorgeschlagenen Methoden erkennen. Die entwickelten lernenden CRF-Ansätze können ohne Änderungen direkt auf andere Datensätze angewendet werden, ein großer Vorteil gegenüber regelbasierten Techniken. Die Gebäude-detectionsergebnisse sind sehr vielversprechend, jedoch bieten sich spezifischere Merkmale sowie eine noch komplexere Modellierung kontextueller Objektrelationen zur weiteren Ergebnisverbesserung an. Die Gebäudehöhenmessungen kombiniert im Gauß-Helmert-Modell liefern Ergebnisse mit Genauigkeiten im Meterbereich.

Die Dissertation ist in der Schriftenreihe „Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Geodäsie und Geoinformatik der Leibniz Universität Hannover“ (ISSN 0174-1454) als Heft Nr. 295 erschienen. Gleichzeitig ist die Arbeit in der Reihe C der Deutschen Geodätischen Kommission bei der Bayerischen Akademie

der Wissenschaften (ISSN 0065-5325) unter der Nr. 669 online veröffentlicht (www.dgk.badw.de).

Herr DIPL.-ING. JENS GÖPFERT wurde am 11.10.2011 an der Fakultät für Bauingenieurwesen und Geodäsie der Leibniz Universität Hannover mit der Arbeit „*Snakes for adapting GIS road and river objects to airborne laser scanning data*“ zum Dr.-Ing. promoviert. Referent: Prof. Dr.-Ing. habil. CHRISTIAN HEIPKE, Leibniz Universität Hannover, Koreferenten: Prof. Dr.-Ing. habil. MONIKA SESTER, Leibniz Universität Hannover, Prof. Dr.-Ing. GEORGE VOSSELMAN, Universität Twente in Enschede, Niederlande, PD Dr.techn. FRANZ ROTTENSTEINER, Leibniz Universität Hannover.

Kurzfassung:

Aufgrund historischer Gegebenheiten speichern die Landesvermessungen ihre topographischen Daten in einem dualen System. Dieses besteht aus dem Digitalen Landschaftsmo dell (DLM) und dem Digitalen Geländemodell (DGM). Das DLM modelliert die Objekte der Erdoberfläche mit Hilfe von 2D Vektordaten, während das DGM eine 2.5D Repräsentation der zugehörigen Geländehöhen darstellt. Dabei wird das Airborne Laserscanning (ALS) oft eingesetzt, um diese Höhendaten zu erfassen. Heutzutage benötigen jedoch viele Anwendungsbereiche zuverlässige 3D Objekte. Deshalb ist es von Vorteil, dieses duale System in ein 3D DLM zu überführen. Infolge unterschiedlicher Methoden für die Erfassung, Verarbeitung und Modellierung weisen die beiden Datensätze Inkonsistenzen auf. Deshalb führt eine einfache Integration des DLM und des DGM zu ungenauen und semantisch fehlerhaften Ergebnissen.

In dieser Arbeit wird deshalb eine neue Methode für die Anpassung der beiden Datensätze vorgestellt, die parametrisch aktive Konturen (auch Snakes genannt) verwendet. Der Ansatz konzentriert sich auf Netzwerke von Straßen und kleineren Flüssen, die in GIS Datenbanken üblicherweise durch ihre Mittelachsen repräsentiert werden, sowie auf breitere Flüsse mit einer flächenhaften Modellierung. Diese Straßen- und Flussobjekte können aus dem DLM einer GIS Datenbank entnommen werden. Danach werden sie genutzt, um

die Snake zu initialisieren. Sie definieren somit die Topologie sowie die interne Energie der aktiven Kontur. ALS Merkmale hingegen üben über die Bildenergie externe Kräfte auf die Snake aus. Nach dem Optimierungsprozess sollten sich die Position und Form der Snake den ALS Merkmalen angepasst haben. In dieser Arbeit werden lineare GIS Objekte mit Hilfe des Konzeptes der Network Snakes angepasst. Ihre Mittelachsen sind jedoch in den ALS Merkmalen schlecht repräsentiert. Deshalb wird ein neues Konzept vorgeschlagen, das es ermöglicht, Netzwerke mit bandartigen Eigenschaften zu modellieren. Dieser Ansatz berücksichtigt die Topologie sowie Informationen über das Profil der Objekte, was die Genauigkeit der angepassten Mittelachsen signifikant steigert. Ein weiteres Problem erwächst aus der Tatsache, dass die Signifikanz der ALS Merkmale für größere Netzwerke stark variiert. So beeinflussen zum Beispiel die Neigung des Geländes in der Nähe der Objekte oder die Reflexionseigenschaften des Oberflächenmaterials diese Merkmale. Aus diesem Grunde ist eine geeignete Gewichtung zwischen der internen Energie des ursprünglichen Snake Modells und der Bildenergie sogar für kleine Netzwerke schwierig. Deswegen kombiniert der neue Algorithmus das Network Snake Konzept mit einem weiteren Ansatz, der die interne Energie und somit das geometrische Modell der Snake so abwandelt, dass Veränderungen der Snake ohne Merkmale in den Sensordaten nicht zugelassen werden. Für diesen Zweck wird die anfängliche Form in eine starre Snake Geometrie überführt, die trotzdem zur lokalen Anpassung an die ALS Daten fähig ist. Das vorgeschlagene vereinigte Snake Modell profitiert somit sowohl von der Topologie als auch von der ursprünglichen Geometrie der GIS Daten. Dieser Aspekt verbessert die Fähigkeit der Methode, mit systematischen Fehlern in den Daten umzugehen. Zusätzlich zu den Merkmalen der behandelten Objekte werden Kontextinformationen wie die Begrenzungen von Brücken und Gebäuden in den ALS Daten als neue Bestandteile in die Bildenergie integriert, um den Optimierungsprozess zu unterstützen.

Im Gegensatz zu den linearen GIS Objekten werden größere Flüsse, welche in den GIS Da-

ten flächenhaft modelliert sind, mit Hilfe von Twin Snakes angepasst. Zusätzliche Bedingungen werden eingeführt, welche die Semantik von Flüssen nutzen, um die Robustheit des Verfahrens zu erhöhen. In diesem Zusammenhang werden die Fließrichtung und der Querschnitt typischer Flüsse berücksichtigt. Ein großer Nachteil der meisten Snake Algorithmen besteht in dem Fehlen einer internen Evaluierung der Ergebnisse. Hierfür wird ein Ansatz vorgeschlagen, der die verschiedenen Energieterme nach der Optimierung analysiert, um automatisch Konturabschnitte zu detektieren, die nicht zu einer zufriedenstellenden Position konvergieren.

Experimente werden präsentiert, welche die Anwendbarkeit und Robustheit des vorgeschlagenen Ansatzes zeigen. Dafür werden vier verschiedene Testdatensätze verwendet, die sowohl für die ALS als auch die GIS Daten unterschiedliche Spezifikationen aufweisen. In allen durchgeführten Tests wird die Genauigkeit der GIS Daten durch die vorgestellte Methode signifikant verbessert.

Die Dissertation ist in der Schriftenreihe „Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Geodäsie und Geoinformatik der Leibniz Universität Hannover“ (ISSN 0174-1454) als Heft Nr. 296 erschienen. Gleichzeitig ist die Arbeit in der Reihe C der Deutschen Geodätischen Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften (ISSN 0065-5325) unter der Nr. 671 online veröffentlicht (www.dgk.badw.de).

Herr DIPL.-ING. (FH) DANIEL MUHLE wurde am 26.10.2011 an der Fakultät für Bauingenieurwesen und Geodäsie der Leibniz Universität Hannover mit der Arbeit „*Gegenseitige Orientierung von Mehrkamerasystemen mit nicht überlappendem Sichtfeld*“ zum Dr.-Ing. promoviert. Referent: Prof. Dr.-Ing. habil. CHRISTIAN HEIPKE, Leibniz Universität Hannover. Koreferenten: Prof. Dr.-Ing. STEFFEN SCHÖN, Leibniz Universität Hannover, Prof. Dr. rer. nat. RALF REULKE, Humboldt Universität zu Berlin. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. THOMAS LUHMANN, Jade Hochschule Oldenburg.

Kurzfassung:

Im Rahmen dieser Arbeit werden erfolgreich Lösungsansätze aus dem Bereich der Photo-

grammetrie und der Computer Vision verknüpft und erweitert, um die gegenseitige Orientierung in einem Mehrkamerasystem aus aufgezeichneten Bildsequenzen zu bestimmen. Die Kameras sind dabei auf einer gemeinsamen Plattform so angebracht, dass sich ihre Sichtfelder nicht überlappen und die Anordnung sich über die Zeit hinweg nicht verändert. Eine Möglichkeit, die gegenseitige Orientierung für derartige Anordnungen zu bestimmen, bieten gemeinsam ausgeführte Bewegungen.

Damit alle Parameter der gegenseitigen Orientierung (Translation, Rotation, Maßstab) ermittelt werden können, muss die ausgeführte Bewegung gewisse Bedingungen erfüllen. Bei der Problemstellung kritischen Bewegungen kann für einige der Parameter keine Lösung gefunden werden. Zu diesen kritischen Bewegungen gehören z. B. eine geradlinige Bewegung ohne jegliche Rotationen oder Bewegungen, bei denen die Rotation ausschließlich in einer vorgegebenen Ebene ausgeführt werden kann. Diese speziellen Bewegungsformen treten u.a. bei dem Einsatz von Mehrkamerasystemen in Robotern oder Fahrzeugen auf und werden in Form von Experimenten mit synthetischen und realen Bildsequenzen in dieser Arbeit detailliert analysiert.

Für die Untersuchungen mit realen Daten ist die Rekonstruktion der Bewegung des Mehrkamerasystems aus den Bildsequenzen notwendig. Für die Experimente wird ein Kamerasystem verwendet, das aus zwei Stereo-systemen besteht und zu jedem Aufnahmzeitpunkt eine dünn besetzte, variable 3D-Punktwolke liefert. Auf der Basis dieser Daten kann die Rekonstruktion der Bewegung des Mehrkamerasystems dann z. B. über die Identifikation von korrespondierenden 3D-Punkten zu unterschiedlichen Zeitpunkten erfolgen. Dieses kombinatorische Problem der Zuordnung von 3D-Punkten erfordert ein automatisch arbeitendes Verfahren. Dazu wird als erster Schwerpunkt dieser Arbeit ein neuartiger Ansatz vorgestellt, der für jeden Punkt einer Punktwolke unter Einbeziehung seiner Nachbarn eine kompakte charakteristische Beschreibung berechnet, mit deren Hilfe die Punktzuordnung effizient und zuverlässig umgesetzt werden kann. Die Auswertung der Experimente und eine detaillierte Analyse des

Algorithmus belegen die Leistungsfähigkeit des entwickelten Verfahrens zur Zuordnung von 3D-Punkten. Bei der Korrespondenzsuche für sechs Bildsequenzen mit jeweils 150-200 Aufnahmen sind nur wenige Fehlzuordnungen aufgetreten, die durch die Verwendung von robusten Verfahren identifiziert werden konnten und somit keinen Einfluss auf die folgenden Auswertungen hatten.

Den zweiten Schwerpunkt der Arbeit bilden Untersuchungen des Einflusses unterschiedlicher Bewegungsformen auf das Verfahren zum Bestimmen der gegenseitigen Orientierung. Im Gegensatz zu anderen Arbeiten werden insbesondere die kritischen Bewegungen und ihr Einfluss auf a) die Bestimmbarkeit und b) die erreichbare Genauigkeit der Parameter der gegenseitigen Orientierung untersucht. Neu ist hier, dass Vorwissen für die Parameter der gegenseitigen Orientierung in die Ausgleichung eingeführt wird. Das Vorwissen wird als unsicher modelliert und als zusätzliche Beobachtung in die Ausgleichung integriert. Diese Vorgehensweise erlaubt es auch bei kritischen Bewegungen, so viele der Parameter der gegenseitigen Orientierung wie möglich zu bestimmen, ermöglicht im Anschluss eine statistische Bewertung der Ergebnisse und bietet die Möglichkeit, Fehler im Vorwissen aufzudecken.

In einer Simulation wird zunächst anhand von unterschiedlichen vorgegebenen Bewegungen untersucht, welche der Parameter der gegenseitigen Orientierung bestimmt und welche Genauigkeiten für die Parameter im günstigsten Fall theoretisch erreicht werden können. Die Simulationen decken insbesondere die für die Aufgabenstellung kritischen Bewegungsformen ab. Anschließend werden die Resultate mit Ergebnissen experimenteller Untersuchungen verglichen. Mit den vorgestellten Methoden zur statistischen Bewertung der Ergebnisse wird darüber hinaus eine ungewollte Veränderung der gegenseitigen Orientierung der Mehrkamerasysteme zwischen den einzelnen Experimenten aufgedeckt.

Die Dissertation ist in der Schriftenreihe „Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Geodäsie und Geoinformatik der Leibniz Universität Hannover“ (ISSN 0174-1454) als Heft Nr. 297 erschienen.

Veranstaltungskalender

2012

11.–12. April: 8. **GeoForum MV 2012** in **Warnemünde**. geomv.de/geoforum/

17.–18. April: 6th **International Satellite Navigation Forum – NAVITCH 2012** in **Moskau**, Russland. eng.glonass-forum.ru

23.–27. April: **Geospatial World Forum 2012** in **Amsterdam**, Niederlande. geospatial-worldforum.org

23.–26. April: **EUSAR 2012**, in **Nürnberg**. eusar.de

7.–9. Mai: **GEOBIA 2012**: 4th International Conference on Geographic Object Based Image Analysis 2012 in **Rio de Janeiro**, Brasilien. inpe.br/geobia2012

8.–10. Mai: 11. **Österreichischer Geodäten- tag in Velden** am Wörthersee, Österreich. ogt2012.at

9. Mai 2012: **Maps4apps – Kartographie auf mobilen Geräten** in **Bonn**, Workshop der Kommission für Angewandte Kartographie der DGFK, Universitätsclub Bonn. angewandte-kartographie.de

7.–12. Juni: **WHISPERS 2012**, Workshop on Hyperspectral Imaging and Signal Processing in **Shanghai**, China.

14.–15. Juni: 8. **GIS-Ausbildungstagung** in **Potsdam**. gis.gfz-potsdam.de/index.php?id=238

4.–6. Juli: **AGIT 2012** - Symposium und Fachmesse für Angewandte Geoinformatik in **Salzburg**, Österreich. agit.at

22.–27. Juli: **IGARSS 2012**, International Geoscience and Remote Sensing Symposium, in **München**. igarss12.org

24. August–3. September: **XXII ISPRS Congress 2012** in **Melbourne**, Australien. isprs2012-melbourne.org/

7.–13. Oktober: **ECCV 2012**, European Conference on Computer Vision, in **Florenz**, Italien. eccv2012.unifi.it/

9.–11. Oktober: **INTERGEO 2012** und **60. Deutscher Kartographentag** und **3. Europäischer Kongress der CLGE** (Comité de Liaison des Géomètres Européens) in **Hannover**. intergeo.de

16.–18. Oktober: **9th Symposium on Location-Based Services** in **München**. lbs2012.tum.de

2013

30. April–2. Mai: 8th **International Symposium on Mobile Mapping Technology 2013** in **Tainan**, Taiwan. conf.ncku.edu.tw/mmt2013/

25.–30. August: 26th **International Cartographic Conference (ICC)** in **Dresden**. icc2013.org/

2.–6. September: XXIVth **CIPA Heritage Documentation Symposium** in **Straßburg**, Frankreich. cipa.icomos.org

9.–13. September: 54. **Photogrammetrische Woche in Stuttgart**.

8.–15. Dezember: **ICCV 2013**, International Conference on Computer Vision, **Sydney**, Australien. iccv2013.org

Korporative Mitglieder

Firmen

- AEROWEST GmbH
 AICON 3D Systems GmbH
 aphos Leipzig AG
 Becker GeoInfo GmbH
 Bernhard Harzer Verlag GmbH
 Blom Deutschland GmbH
 Brockmann Consult
 bsf swissphoto GmbH
 Büro Immekus
 CGI Systems GmbH
 con terra GmbH
 DB Netz AG
 DELPHI IMM GmbH
 Deutsches Bergbau-Museum
 EFTAS Fernerkundung Technologietransfer GmbH
 ESG Elektroniksystem- und Logistik-GmbH
 Esri Deutschland GmbH
 EUROPEAN SPACE IMAGING
 Eurosense GmbH
 fokus GmbH
 g.on experience gmbh
 GAF GmbH
 GeoCart Herten GmbH
 GeoContent GmbH
 Geoinform. & Photogr. Engin. Dr. Kruck & Co. GbR
 geoplana Ingenieurgesellschaft mbH
 GEOSYSTEMS GmbH
 GGS - Büro für Geotechnik, Geoinformatik, Service
 Hansa Luftbild AG
 IGI - Ingenieur-Gesellschaft für Interfaces mbH
 ILV Ing.-büro für Luftbildausw. und Vermessung
 Imetric 3D GmbH
 Infoterra GmbH
 INVERS - Industrievermessung & Systeme
 ITT Visual Information Solutions Germany
 J. Linsinger ZT-GmbH
 Jena-Optronik GmbH
 Leica Geosystems GmbH
 Luftbilddatenbank-Würzburg
 Messbildstelle GmbH
 Microsoft Photogrammetry
 MILAN Geoservice GmbH
 M.O.S.S. Computer Grafik Systeme GmbH
 PHOENICS GmbH
 PMS - Photo Mess Systeme AG
 RIEGL Laser Measurement Systems GmbH
 RWE Power AG, Geobasisdaten/Markscheide
 wesen
 technet GmbH
 TRIGIS Vermessung + Geoinformatik GmbH
 Trimble Germany GmbH
 trimetric 3D Service GmbH
 Wichmann, VDE Verlag GmbH
 Z/I Imaging Ltd.

Behörden

- Amt für Geoinformationswesen der Bundeswehr
 Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft
 Bundesamt für Kartographie und Geodäsie
 Bundesmin. für Ernäh., Landw. u. Verbraucherschutz
 Hess. LA für Bodenmanagement und Geoinformation
 Innenministerium NRW, Gruppe Vermessungswesen
 Inst. für Umwelt- und Zukunftsforschung
 LA für Geoinformation und Landentwicklung, BW
 LA für Vermessung und Geoinformation, Bayern
 LB Geoinformation und Vermessung, Hamburg
 LB f. Küstenschutz, Nationalpark u. Meereschutz, SH
 Landesvermessung und Geobasisinformation Nieders.
 Märkischer Kreis, Vermessungs- und Katasteramt
 Regierungspräs. Tübingen, Abt. 8 Forstdirektion
 Regionalverband Ruhr
 Staatsbetrieb Sachsenforst Pirna
 Stadt Bocholt, Fachbereich 31
 Stadt Düsseldorf, Vermessungs- und Katasteramt
 Stadt Köln, Amt für Liegensch., Verm. und Kataster

Stadt Wuppertal, Verm., Katasteramt und Geodaten

Thüringer LA für Vermessung und Geoinformation

Hochschulen

BTU Cottbus, Lehrstuhl für Vermessungskunde

FH Frankfurt a.M., FB 1, Studiengang Geoinformation

FH Mainz, Inst. f. Raumbez. Inform.- und Messtechnik

Jade Hochschule, Inst. für Angew. Photogr. und Geoinformatik

HCU HafenCity Universität Hamburg, Geomatik

HfT Stuttgart, Vermessung und Geoinformatik

HS Bochum, FB Vermessung und Geoinformatik

HS Karlsruhe, Fakultät für Geomatik

HTW Dresden, FB Vermessungswesen/Kartographie

LUH Hannover, Inst. für Kartogr. und Geoinformatik

LUH Hannover, Inst. für Photogrammetrie und GeoInformation

MLU Halle, FG Geofernerkundung

Ruhr-Uni Bochum, Geographisches Institut

RWTH Aachen, Geodätisches Institut

TU Bergak. Freiberg, Inst. f. Markscheidewesen u. Geodäsie

TU Berlin, Computer Vision & Remote Sensing

TU Berlin, Inst. f. Geodäsie und Geoinformationstechnik

TU Braunschweig, Inst. für Geodäsie und Photogrammetrie

TU Clausthal, Inst. für Geotechnik und Markscheidewesen

TU Darmstadt, Inst. für Photogrammetrie und Kartographie

TU Dresden, Inst. für Photogrammetrie und Fernerkundung

TU München, FG Photogrammetrie und Fernerkundung

TU Wien, Inst. für Photogrammetrie und Fernerkundung

Uni Bonn, Inst. für Photogrammetrie

Uni Göttingen, Inst. für Waldinventur und Waldwachstum

Uni Heidelberg, IWR Interdis. Zentr. f. Wiss. Rechnen

Uni Kassel, FB Ökologische Agrarwissenschaften

Uni Kiel, Geographisches Institut

Uni Stuttgart, Inst. für Photogrammetrie

Uni Würzburg, Geographisches Institut

Uni zu Köln, Geographisches Institut

Corrigendum to PFG 1/2012

Dear readers of PFG,

on page 14 of a.m. volume the legend of Fig. 12 must read:

Fig. 12: Sentinel-4 FPA design exploded diagramm (left) and sizes of the focal plane relative to a hand (right).

On page 66 the correct phone number is +41-44-633-3287.

We apologize for the inconvenience.

Schweizerbart Science Publishers

agit_2012

SYMPOSIUM und FACHMESSE
Angewandte Geoinformatik

GI Impulse vernetzen

4. – 6. Juli 2012
Salzburg



> www.agit.at

