

PRG

Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation

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

Jahrgang 2003, Heft 4

Hauptschriftleiter:
Prof. Dr.-Ing. habil. Klaus Szangolies

Schriftleiter:
Dr. rer.nat. Carsten Jürgens und Dr.-Ing. Eckhardt Seyfert

Redaktionsbeirat (Editorial Board): Ralf Bill, Christian Heipke, Olaf Hellwich,
Barbara Koch, Hans-Gerd Maas, Jochen Schiewe, Matthäus Schilcher, Christiane
Schmullius und Monika Sester.



E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung
(Nägele u. Obermiller) Stuttgart 2003



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



Alfred-Wegener-Stiftung
(AWS) zur Förderung
der Geowissenschaften

Herausgeber:

© 2003 Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation (DGPF) e.V.
Geschäftsstelle: Dr. Klaus-Ulrich Komp, c/o EFTAS Fernerkundung Technologietransfer GmbH, Ostmarkstraße 92, D-48145 Münster, e-mail: Praesident@dgpf.de
Internet: <http://www.dgpf.de>

Published by:

E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller), Johannesstraße 3 A,
D-70176 Stuttgart. Tel.: 07 11/35 14 56-0, Fax: 07 11/35 14 56-99, 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

Hauptschriftleiter: Prof. Dr.-Ing. habil. Klaus Szangolies, Closewitzer Str. 44, D-07743 Jena.
e-mail: Klaus.Szangolies@t-online.de

Schriftleiter: Dr. rer.nat. Carsten Jürgens, Universität Regensburg, Institut für Geographie D-93040 Regensburg, e-mail: carsten.juergens@geographie.uni-regensburg.de und Dr.-Ing. Eckhardt Seyfert, Landesvermessung und Geobasisinformation Brandenburg, Heinrich-Mann-Allee 103, D-14473 Potsdam, e-mail: eckhardt.seyfert@lvermap.brandenburg.de

Erscheinungsweise: 7 Hefte pro Jahrgang.

Bezugspreis im Abonnement: € 98,- pro Jahrgang. Mitglieder der DGPF erhalten die Zeitschrift kostenlos.

Anzeigenverwaltung: Dr. E. Nägele, E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller), Johannesstraße 3A, D-70176 Stuttgart, Tel.: 07 11/35 14 56-0; Fax: 07 11/35 14 56-99.
e-mail: mail@schweizerbart.de, Internet: <http://www.schweizerbart.de>

Bernhard Harzer Verlag GmbH, Westmarkstraße 59/59a, D-76227 Karlsruhe, Tel.: 0721/944020, Fax: 0721/9440230, e-mail: Info@harzer.de, Internet: www.harzer.de

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

PFG – Jahrgang 2003, Heft 4

Inhaltsverzeichnis

Originalbeiträge

| | |
|---|-----|
| GRIMM, A.: 25 Jahre IGI, vom CPNS zu CCNS und AEROcontrol | 245 |
| ACKERMANN, F.: Mit dem „Bodensee-Test“ 1982 fing es an – Eine Erinnerung zur Entwicklung der Kamera-Positionierung für die Aerotriangulation | 259 |
| COOPER, G.: Cooper Aerial Survey's Precise Photo Positioning | 265 |
| CRAMER, M.: Erfahrungen mit der direkten Georeferenzierung | 267 |
| DREESEN, F. & SCHROTH, R.: Moderne Verfahren der Geo-Referenzierung in der praktischen Anwendung | 279 |
| GRUBER, M., LEBERL, F. & PERKO, R.: Paradigmenwechsel in der Photogrammetrie durch digitale Luftbildaufnahme? | 285 |
| HERMS, P.: Vom Sonnenkompass zum CCNS4 – 80 Jahre Navigation von Bildflügen bei der Hansa Luftbild | 299 |
| HUG, C.: Airborne Laserscanning und direkte Sensororientierung | 303 |
| KLUSON, Z. & NAGY, L.: Two Czechoslovakian Army Officers Privatise Operations | 307 |
| KRUCK, E.J.: Drehungen des Raumes und Koordinatentransformationen | 311 |
| MÜLLER, R., PALUBINSKAS, G., REINARTZ, P., SCHROEDER, M., AMANN, V. & STÄTTER, R.: From Airborne Digital Raw Data to Image Maps | 317 |
| READ, R.E.: 20 Years of CPNS/CCNS Operations | 327 |
| TANG, L., LI, Y., LI, X., ZHAO, J. & GONG, X.: First Experiences with CCNS/ AEROcontrol in China | 333 |
| WANNINGER, L.: Permanente GPS-Stationen als Referenz für präzise kinematische Positionierung | 343 |

Berichte und Mitteilungen

| | |
|---|-----|
| Berichte | |
| 2. Oldenburger 3D-Tage, 27/28.2.2003 | 349 |
| 8. Münchner Fortbildungsseminar GIS, 12.–14.3.2003 | 350 |
| Förderpreis Geoinformatik 2003 | 352 |
| Workshop „New Developments in Close Range Photogrammetry“ in Bonn, 25.–28.3.2003 | 353 |
| Hochschulnachrichten | |
| Technische Universität Berlin, C. LESER | 355 |
| Technische Universität Wien, N. PFEIFER | 356 |
| Hochschule Vechta, eLearning – Tutorial | 358 |
| Vorankündigungen | 359 |
| Zum Titelbild | 363 |
| Neuerscheinungen | 367 |

25 Jahre IGI, vom CPNS zu CCNS und AEROcontrol

ALBRECHT GRIMM, Kreuztal

Keywords: aerial photogrammetry, aerial survey flight missions, mission planning, guidance and sensor management, GPS/ IMU; laser scanner, IGI, CCNS, AEROcontrol

Summary: 25 years of IGI – from CPNS to CCNS and AEROcontrol. On the occasion of 25 years existence of IGI (engineering company for interfaces), the development of the company is demonstrated. Several projects are discussed, in which IGI has been involved.

Zusammenfassung: Aus Anlass des 25-jährigen Bestehens von IGI (*Ingenieur-Gesellschaft für Interfaces*) wird die Entwicklung der Firma vorgestellt. Verschiedene Projekte, an denen IGI beteiligt war, werden erläutert.

Vorwort

Mit den Beiträgen in diesem Heft soll an eine Entwicklung erinnert werden, welche die Flugführung und das Sensormanagement beim photogrammetrischen Bild- und sonstigen Sensorflug entscheidend beeinflusst hat. Für die Möglichkeit, das Heft mit Beiträgen von Anwendern und Interessenten des CCNS und AEROcontrol Systems zu gestalten, sei der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation vielmals gedankt.

1 Es begann mit einer Verwechslung

Als die Fachhochschule Siegen-Gummersbach 1972 in die Gesamthochschule Siegen überführt wurde, legte die neue Institution erstmals ein Vorlesungsverzeichnis vor. Ein Maschinenfabrikant fand dort die Schlagworte *Praktische Geodäsie und Photogrammetrie*. Da es in seinem Betrieb Schwierigkeiten mit einer *Photodiode* bei der Umsetzung von Zeichnungen zur Steuerung einer Schaumstoff-Schneidemaschine gab, sollte der „Photo“-Experte der neuen Hochschule Abhilfe schaffen. Schnell war geklärt, dass hier wohl ein Missverständnis vorlag. Der technische Chef hatte jedoch Interesse an

der Photogrammetrie gefunden, eine Laborbesichtigung in Siegen wurde vereinbart. Dort fand der Maschinenbauer die von ihm gesuchte Lösung in Form einer kleinen Gerätezusammenstellung für die Architektur-Photogrammetrie: Digitizer – Rechner – Plotter. Nach Ansicht des Chefs konnten die Zeichnungen mit dem Digitizer übernommen werden und ein Computer sollte dann seine Schneidemaschine (Plotter) steuern. Des Ingenieurs Frage: „Können Sie uns das erforderliche Interface bauen?“, war die Geburtsstunde der Ingenieur-Gesellschaft für Interfaces mbH (IGI).

2 CPNS zur Flugführung in Nigeria

Das Ingenieurbüro GEODATA SERVICE, Olpe, hatte den Auftrag, Vermessungsarbeiten bei dem Bau der neuen nigerianischen Hauptstadt Abuja durchzuführen. Wegen der örtlichen Verhältnisse – konstante Bewölkung mit einigen Wolkenlöchern – war es schwierig, eine Befliegung durchzuführen. Zur Lösung dieser Frage suchte GEODATA ein System, das ein Flugzeug auf vorgeplanten Linien durch die Luft führte und bei Wolkenlöchern Aufnahmen machte. Da die Löcher sich bewegten, wollte man nach und nach alle Aufnahmen zusammenstellen.

Anfragen von GEODATA nach einem derartigen Flugführungs- und Bildverwaltungssystem bei den führenden Herstellern von Luftbildkameras führten letztlich zu dem Hinweis, sich an IGI in Siegen zu wenden, wo dann das *Computer-controlled Photo Navigation System (CPNS)* entwickelt wurde.



Abb. 1: Geräterack mit *Trident-III* (unten) sowie *CPNS* Computer und Display vor dem Einbau in das Flugzeug.

Leider hat das *CPNS* Nigeria nie gesehen, da zwischenzeitlich mehrere Militärputsche stattfanden. Seit 1995 ist das Nachfolgesystem *CCNS* (Computer Controlled Navigation System) in Nigeria erfolgreich im Einsatz.

3 Flugführung in den 70er und 80er Jahren

Über die Situation zur Flugführung von Bildflugzeugen haben WINKELMANN (1977) und HERMS (in diesem Heft) berichtet. CORTEN (1959/60 & 1984) hatte Ziele formuliert und ZORN (1981) über den Einsatz von Taschenrechnern vorgetragen. Grundsätzlich wurde mit Navigationsteleskop und Überdeckungsregler oder firmeneigenen Lösungen gearbeitet. Um mit Unterstützung eines Computers ein Flugzeug auf einer geplanten Trasse halten zu können, muss ermittelt werden, wo die Maschine sich aktuell befindet und wo sie sein sollte. Ein SOLL-IST-Vergleich ist erforderlich. Das Ergebnis sollte, einfach interpretierbar, an einem Bildschirm darstellbar sein. Die Anzeige sollte keine Instrumentenflug-Berechtigung des Piloten

voraussetzen. Zur Positionsbestimmung standen 1982 im Wesentlichen zur Verfügung:

- Inertiale Navigations-Systeme (INS)
- Doppler Geräte
- Strecken (DME, P-DME) und Strecken mit Winkeln (Tacan) sowie
- Loran-C/ Cheika und Omega Netze

Weltweit einsetzbar war nur das Omega Netz, jedoch für den Bildflug zu ungenau. Loran-C und Cheika Netze gab und gibt es nur für Gebiete, bei denen es die Interessen der damaligen Großmächte erforderten. Die erzielbare Positionsgenauigkeit von etwa 1 km war nur bedingt brauchbar. Als lokales Loran System waren Geräte von Motorola und Sercel verfügbar, die hauptsächlich im Bereich der genaueren Schiffsnavigation zur Anwendung kamen.

Mit Doppler Systemen hatte es erfolgreiche Einsätze für Vermessungsflüge gegeben. Aber die Handhabbarkeit des Systems durch die Besatzung ließ viele Wünsche offen. Mit dem Litton *PICS* war ein INS-basiertes Flight-Management-System für den Bildflug verfügbar, das für kleine Bildmaßstäbe eingesetzt werden konnte. Wie beim Doppler mussten beim *PICS* die Anfangs- und Endkoordinaten jeder Fluglinie mühsam per Hand eingegeben werden, eine nicht unerhebliche Fehlerquelle. Des Weiteren driftete das INS. Um dies zu beheben, war es erforderlich, während einer Mission bekannte Punkte zum „Update“ zu überfliegen.

DME und Tacan Stationen waren in der Bundesrepublik reichlich vorhanden, dafür in anderen Ländern umso weniger.

Neben dem Hyperbel-Navigationsystem der Firma Sercel gab es in Frankreich das *Trident-III* System der Firma Thomson-CSF, das auf genauer Streckenmessung beruhte, also ein P-DME. Mit diesem Gerät konnten, bei einer Genauigkeit von besser 10 m, Entfernungen bis 260 km gemessen werden. Portable Bodenstationen (Beacon) von der Größe eines Handkoffers und der im Flugzeug zu installierende Interrogator, für die gleichzeitige Abfrage von bis zu vier Beacons, machten eine zuverlässige und

Dass die IGI-Entwicklungsziele richtig definiert waren, wurde auf der Photogrammetrischen Woche 1983 in Stuttgart deutlich, als der Geschäftsführer von Hansa Luftbild die Situation bei der Herstellung von Orthophotos beschrieb. Herr BRUNNTHALER (1983) trug dort vor: „If the required photo scale is a large one, the cost of the film material for 80 or 90% overlap is very high as compared to the operating cost of the aircraft. Besides, on large photo scales, the cycling time of the camera between exposures will not allow 80 or 90% overlap. One has to use pin pointed photography, otherwise an assembly of orthophotos or part of it to cover a map sheet cannot be avoided.“

5 Das Bodensee-Projekt

Bei der Deutschen Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt (DFVLR) in Oberpfaffenhofen wurde unter der Leitung des Testpiloten Dr. WILCKENS ein Projekt zur Entwicklung eines Flugführungssystems für die Forschungsflugzeuge der DFVLR durchgeführt.

Der Vorschlag von IGI, den *Trident-III* von Thomson-CSF für den photogrammetrischen Bildflug zu testen, stieß bei der DFVLR auf Interesse. Die Fa. Zeiss, Oberkochen, stellte ein Statoskop, die Fa. Wild, Heerbrugg, den Prototypen der neuen *RC10A* und KODAK eine Rolle Film zur Verfügung.

Das Landesvermessungsamt Baden-Württemberg hatte am Bodensee eine Befliegung durchführen lassen, deren Signalisierung noch vorhanden war. So entstand eine zusammengewürfelte Interessengemeinschaft, deren Ziel es war, den Nachweis zu führen, dass mit dem *Trident* gerade und parallele Flugstreifen geflogen werden konnten. Die vielversprechenden Untersuchungen von Prof. ACKERMANN zur Verwendung von Statoskopdaten lagen vor. So war es naheliegend, die vom *Trident-III* erzeugten Positionen als Hilfsdaten in die Aerotriangulation einzuführen. Positionen sind aber nur ein Teil der Elemente der äußeren Orientierung. Um auch die Winkel zu erhalten, wur-



Abb. 4: Der Wild *RC10A* Prototyp mit künstlichem Horizont; im Hintergrund ist ein Alu-Rohr zu erkennen, an dem die nach unten gerichtete *Trident-III* Antenne befestigt war.

de an der *RC10A* ein künstlicher Horizont montiert. Der IGI Rechner sollte Φ/Ω -Winkel zusammen mit den Statoskop Daten und Messwerten eines weiteren Präzisions-Drucksensors registrieren.

Die Standorte der *Trident* Bodenstationen in Mössingen, Schramberg, Konstanz und Laupheim wurden in der TK 25 festgehalten. Zeit und Geld für eine genaue Positionsbestimmung waren nicht vorhanden. Über das Ergebnis des Tests Bodensee berichtet ACKERMANN in diesem Heft im nachfolgenden Beitrag. Hier sei deshalb nur festgehalten, dass mit dem Projekt Bodensee erstmals der Einsatz von Antennen- bzw. Kamerapositionen in die Aerotriangulation zur Einsparung von Passpunkten erfolgreich durchgeführt werden konnte (ACKERMANN 1983 & 1989).

6 Die Befliegung des Sauerlandes 1983 mit CPNS

Im Zuge der Entwicklung der Orthophototechnik kam es zur Forderung nach gezielten Luftbildaufnahmen. *One Photo = One Mapsheet* war das Schlagwort. Um mit einem Projekt zu beweisen, dass *CPNS* diese Forderungen erfüllen könne, wurde mit dem Landesvermessungsamt Nordrhein-Westfalen (LVA NRW) dahingehend Übereinkunft erzielt, den Block „Sauerland“ für die

Erneuerung der DGK 5 im Bildmaßstab 1:12 500 mit *CPNS* und *Trident-III* zu befliegen. Für jedes DGK5 Kartenblatt sollten zwei Aufnahmen gemacht werden, eine in der Mitte, eine am Rand, also Basis 1 km, Linienabstand 2 km. Für den Bildflug selbst war das Schulflugzeug des ITC Enschede eingeplant, die *RC10A* Kamera wurde erneut von der Fa. Wild, Heerbrugg kostenlos zur Verfügung gestellt. Über die Situation kurz vor Durchführung des Bildfluges kann auf den Beitrag von READ (in diesem Heft) verwiesen werden. Alle Mitarbeiter am Projekt waren so vom Erfolg überzeugt, dass bereits der Termin für einen Workshop festgelegt wurde, auf dem die Ergebnisse präsentiert werden sollten. Es klappte tatsächlich. Zwei Tage vor der Veranstaltung auf dem Siegerland-Flugplatz, zu der etwa 40 Teilnehmer aus ganz Europa angereist waren, konnte ein repräsentativer Teilblock mit 4 Linien und insgesamt 44 Bildern befliegen werden; die Ergebnisse waren wie erhofft gut. Der Workshop (IGI 1983) war ein Erfolg; Kompetenz war nachgewiesen worden (BEUMELBURG 1982 & 1983, HERMS 2003, O'BRIAN 1984). Dass IGI auf der richtigen Spur war, geht aus Bemerkungen des Leiters der photogrammetrischen Abteilung des LVA NRW hervor, der später ausführte: „Im ausgereiften Zustand ist das System für die Vermessungsbehörden unzweifelhaft von Interesse. Kann so doch ein gezielter Bildflug leicht und sicher ausgeführt und auf die Methode der schnellen Bildfolge verzichtet werden. Hierdurch treten Kosteneinsparungen um 25% ein, und die Archive werden durch die nicht notwendigen Aufnahmen nicht belastet“ (PAPE 1988).

7 CCNS in der Antarktis: GANOVEX-IV

Ein weiteres Projekt begann im Sommer 1984. Die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in Hannover (BGR) suchte zum Einsatz in der Antarktis ein Flugführungssystem. Im Rahmen des Projektes GANOVEX-IV (German Antarctic North Victorialand Expedition) sollten gro-

ße Teile vom Victoria-Land und der Ross-See befliegen werden. Ein Doppler Gerät und das System *Syledis* der Fa. SERCEL sollten zum Einsatz kommen. Wegen der starken Schwankungen des Magnetfeldes am Südpol und einer eventuell glatten Ross-See, schien IGI der Einsatz der ausgesuchten Doppler-Navigationsanlage ungeeignet zu sein. Aus den Überlegungen für das Projekt Nigeria war klar, hier konnte nicht das Hyperbel-Navigationsverfahren *Syledis* zum Einsatz kommen, das war eine Aufgabe für das P-DME System vom Typ *Trident-III*. Die von der BGR zur Versorgung der Bodenstationen vorgesehenen Stromgeneratoren schienen für den Dauereinsatz im Eis über mehrere Wochen nicht praktikabel. Daher wurde ein Vorschlag für die automatische Versorgung mittels Solarenergie entwickelt.

Da bei dem Antarktis-Projekt keine Photos gemacht werden sollten, vielmehr „Aero-Magnetic Survey“ durchzuführen war (BACHEM 1985), wurde das „P“ des *CPNS* durch ein „C“ ersetzt. Seither werden alle IGI Flugführungssysteme mit dem Namen *CCNS – Computer Controlled Navigation System* – versehen.

Im Spätsommer 1984 erhielt IGI den Auftrag, die Forschungsflugzeuge *POLAR 2* und *POLAR 3* vom Typ Dornier *Do 228-100* mit *CCNS/Trident* auszurüsten und die Bodenstationen des *Trident* mit Solarenergie zu versorgen. Die Auftragserteilung erfolgte in der letzten Minute. Die französischen Ingenieure wurden aus ihrem Sommerurlaub zurückgerufen, um die *Trident-III* Anlage von 260 km Reichweite auf die in der Antarktis benötigten 560 km umzurüsten.



Abb. 5: *POLAR 2* Forschungsflugzeug des AWI in der Antarktis.



Abb. 6: *Trident-III* Bodenstation mit Stromversorgung durch die Sonne; im Vordergrund ein Magnavox *TRANSIT* Empfänger zur Positionsbestimmung.

Der Einsatz des *CCNS/Trident* in der Antarktis war noch mit Schwierigkeiten verbunden (BECK 1992). Diese wurden z. T. durch Sichtlinienprobleme beim *Trident* oder die Benutzung der falschen Antenne während des Fluges, Ausfall von Bodenstationen wegen Wolken usw. ausgelöst. Beim Flug in Richtung offene Ross-See musste die Heck-Antenne benutzt werden, auf dem Rückflug war auf die über den Piloten installierte Antenne manuell umzuschalten.

Obwohl die Statik der Solarpaneele und der Alugestelle für Windgeschwindigkeiten bis 180 km/h ausgelegt war, sind einige Paneele nach einem heftigen Sturm im Nirwana verschwunden.

Die Antarktis wird gedanklich mit Eis verbunden. Also wurden teure Eishaken aus Edelstahl zur Befestigung der Verspannung für die Paneelgerüste beschafft. Welch Erstaunen, als dann die *Trident* Station auf dem Mount Eribus in Lavaschlacke befestigt werden musste.

Insgesamt konnten mit dem *CCNS/Trident* System 49000 Linien-km von geplanten 55000 km erfolgreich abgeflogen werden. Dies mit einer Genauigkeit, die bisher in der Antarktis noch nicht erzielt worden war (HEIMES 1986).

Unter dem Titel „Do-228s return from Antarctica“ wurde in der US-Zeitschrift *Aviation Convention News* berichtet: „For navigation and aerial survey, said Dornier, the aircraft were equipped with a system that computed position automatically from

radio beacons and provided the pilot with flight path information via a cockpit display“ (R. G. 1985).

Leider konnte das *Trident* System von IGI nicht mehr für andere Aufgaben eingesetzt werden, große Befliegungsprojekte waren zu dieser Zeit rar. Dennoch brachte das Antarktis-Abenteuer IGI in der technischen Entwicklung von *CCNS* weiter. Bei der Positionsbestimmung wurde ein geodätischer Ausgleichsalgorithmus eingesetzt. Dies hatte die unangenehme Eigenschaft, dass die Liniendarstellung „geplant/geflogen“ noch sehr unruhig war. Ebenso mussten Richtungsänderungen aus Positionsänderungen abgeleitet werden, was zu einer verzögerten, springenden Bildschirmanzeige führte. Für Piloten eine unangenehme Situation, da sie eine stabile Anzeige, wie bei den anderen Fluginstrumenten auch, erwarteten. Sie regten an, den Kurskreisel des Flugzeuges zu integrieren. Herr VAN DER WAL vom Meetkundige Dienst in Delft gab den Tipp, es doch mal mit einer Kalman-Filterung zu versuchen, damals noch ein Fremdwort für viele Vermessungsingenieure. So kam die Veröffentlichung von HUEP (1985) mit Hinweisen zur Kalman-Filterung zur rechten Zeit. Der neue Algorithmus zur gleichzeitigen Verarbeitung von Positionen, Geschwindigkeiten und Richtungsänderungen zeigte den gewünschten Erfolg und erlaubte zusätzlich noch die Bestimmung des Driftwinkels. Von da ab war es möglich, die Drift-einstellung für die Aufhängungen der Luftbildkameras automatisch über *CCNS* einzustellen.

8 Flugführung und Positionierung in der Syrischen Wüste

Zum Zwecke der Prospektion suchte das dänische Forschungsinstitut *RISOE* im Auftrag der *IAEA* (International Atomic Energy Agency) in Wien und der *SAEA* in Damaskus ein Flugführungs- und Positioniersystem zum Einsatz in der Syrischen Wüste. Hierzu wurde von IGI ein System vorgeschlagen, das mit dem *North Saudi Arabian Chain* des amerikanischen *Loran-C* Netzes arbeiten sollte.

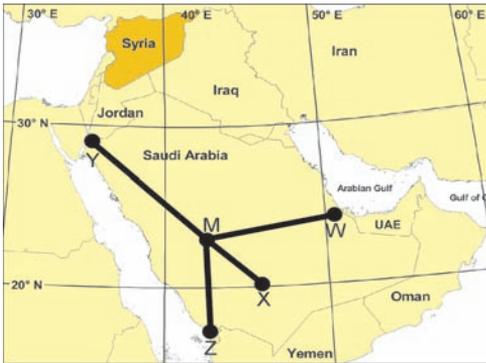


Abb. 7: Das North Saudi Arabian Chain diente als Positionier-Sensor für das CCNS/Loran in der Syrischen Wüste.

In Damaskus angekommen mussten erst Honeurs beim UN-Vertreter und der SAEA gemacht werden, bevor das Gerät in einem Mi-8 Hubschrauber eingebaut werden konnte. Da die Mechaniker nicht die Schnellsten waren, führte der Begleitoffizier, ein Oberstleutnant, die Montage der Loran-Antenne selbst durch. Auf der Einsatzbasis Tadmor/Palmyra wurde den RISOE- und IGI-Ingenieuren nahegelegt, nur den Weg zwischen Büro und Toilette alleine zu gehen, sonst nur mit Begleitpersonal. Um diese angespannte Situation ein wenig aufzulockern, wurden der Platzkommandant und sein Vertreter abends zum Essen eingeladen, wo sich ein nettes, später freundschaftliches Gespräch entwickelte. Vom folgenden Tag an durften sich die Westler, da Freunde des Chefs, auf der ganzen Basis frei bewegen!

Positions-Koordinaten waren streng geheim und konnten von den Syrern nicht zur Verfügung gestellt werden, wurden aber zum täglichen Update der Loran-Position benötigt. Ein aus Deutschland mitgebrachter TRANSIT-Empfänger leistete hier Abhilfe.

Da die syrischen Piloten kein Englisch und die IGI-Mitarbeiter kein Arabisch verstanden, musste die Einweisung in das System mit „Händen und Füßen“ durchgeführt werden. Dies funktionierte recht gut, denn das Ende der ersten geplanten Linie, eine Grenzstation zum Irak, wurde ohne Schwierigkeiten angeflogen. Nun war die Neugier

des Piloten entfacht. Er flog die gleiche Linie in entgegengesetzter Richtung zurück. Als der Hubschrauber dabei über ein Beduinenzelt kam, das bereits im Hinweg überflogen worden war, strahlte sein Gesicht, der Abnahmetest war bestanden.

8 Seeüberwachung bei den „Grand Banks of Newfoundland“

Während eines Kongresses in den USA hatte Prof. CORTEN einen Kanadier kennen gelernt, der das See-Grenzgebiet an der Ostküste zwischen USA und Kanada gerne aus der Luft mit Hilfe der Photogrammetrie überwachen wollte. Die kanadische Seite befürchtete, dass dort von den Amerikanern mehr Hummer-Fangkörbe ausgelegt wurden als erlaubt. Leider kam es nie dazu, diese interessante Frage aus der Luft mit Hilfe von CCNS zu klären, da der Kanadier seine Arbeitsstelle wechselte.

Um so erstaunter war man bei IGI, einen Anruf aus St. Johns, Neufundland, zu bekommen. Es wurde ein genaues Positioniersystem für Ice-Patrol und zur Überwachung der 200 Seemeilen-Wirtschaftszone um Neufundland gesucht. Der Kanadier hatte sich an IGI erinnert.

GPS kam zur Lösung der Aufgabe nicht in Frage, da es zu dieser Zeit kontinuierlich nur für 5–10 Minuten verfügbar war.

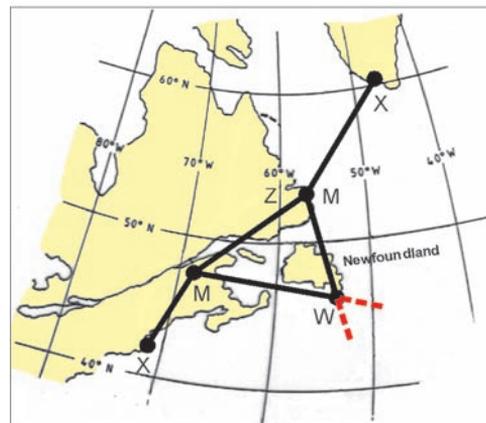


Abb. 8: Die beiden Loran-C Netze im Bereich Neufundland sowie der rot markierte Bereich der Baseline Extension.



Abb. 9: King Air B200 Special Mission Flugzeug, ausgerüstet mit IGIs Multi-Sensor-System.

Dennoch war die Aufgabenstellung lösbar, weil das Operationsgebiet von zwei Loran-C Netzen, dem *Canadian East* und dem *Labrador Sea Chain*, abgedeckt wurde. Bei näherer Betrachtung stellte sich heraus, dass das Gebiet, in dem die höchste Genauigkeit gefordert wurde, in der *Base-line Extention* der beiden Chains lag. Damit war mit dem standardmäßigen Hyperbelmode der Loran-Empfänger keine Position zu erzielen. Untersuchungen zeigten jedoch, dass mit einer Kombination der nachstehend aufgeführten Sensoren die geforderte Genauigkeit von besser als $1/3$ sm erzielbar war:

- Loran-C, Dual-Chain Empfänger, von IGI modifiziert für einen kombinierten rho/hyperbolic Modus einschließlich Rubidium-Zeitnormal,
- GPS, sequentieller Ein-Kanal L1 Empfänger zum Positions-Update und Detektion von Loran Cycle-Slips und
- Luftdaten Sensor (Air Data) und Kompass (DG) zur Stützung des Kalman-Filters.

Dieses Multi-Sensor-System lieferte Positionen und Geschwindigkeiten an ein Litton V5 Anti-Submarine Radar, das vom Canadian Department of Fisheries and Oceans an Bord von *King Air B200* Flugzeugen zum Aufspüren von Trawlern eingesetzt wurde, die illegal in der 200 sm-Zone fischten.

Das von IGI gelieferte System hat, bis GPS für 24 Stunden zur Verfügung stand, zuverlässig seinen Dienst getan.

10 Erste CCNS Systeme für Luftbildfirmen

Seit der ersten Vorstellung des *CPNS* Gerätes auf dem Siegerland Flugplatz (IGI 1983), hatte es immer wieder Kontakte mit Hansa Luftbild in Münster gegeben, um diese Firma von den Vorzügen eines derartigen Gerätes zu überzeugen. Die Demonstration von *CCNS3* mit DME/Tacan und Kurskreisel Anschluss (directional gyro, DG), hatte bei mehreren Blockbefliegungen für die Deutsche Grundkarte nachgewiesen, dass gezielte Aufnahmen „Blattmitte/Blattrand“ mit der erforderlichen Genauigkeit gemacht werden konnten. Auch die Drift konnte ermittelt und zur Einstellung an die Kamera übergeben werden.

Wie in jedem Unternehmen, gab es auch bei Hansa Luftbild einige mehr fortschrittlich und andere mehr konservativ orientierte Mitarbeiter. Letztere argumentierten, für eine international tätige Firma werde ein System benötigt, das auch weltweit einsetzbar sei. Dies war mit den Sensoren DME/Tacan leider nicht der Fall.

Nachdem IGI drei *CCNS* Geräte nach Kanada geliefert und unter Einsatz eines Drucksensors auch mit drei GPS Satelliten eine Position erzielt werden konnte, wurde nach kurzer Erprobung ein *CCNS4/ GPS + DG* an Hansa Luftbild aus Münster verkauft. Am Jahresende waren alle Flugzeuge dieser Firma mit *CCNS* Geräten ausgerüstet (ARNHOLD 1993, HERMS 1991).

Im Sommer 1990 fragte die Firma Carl Zeiss Jena nach, ob IGI die neue *LMK-2000*



Abb. 10: CCNS3, bestehend aus: Sperry C-13 Kompass, 2x Collins DME-42, IGI Computer und Display, Tastatur und Datacard, sowie CDI.



Abb. 11: Bildflugzeug von Hansa Luftbild mit Zeiss *RMK-TOP*, Trimble 4000 DGPS Gerät und IGI *CCNS4*.



Abb. 12: Let *L-410-UVP* von Berliner Spezialflug.

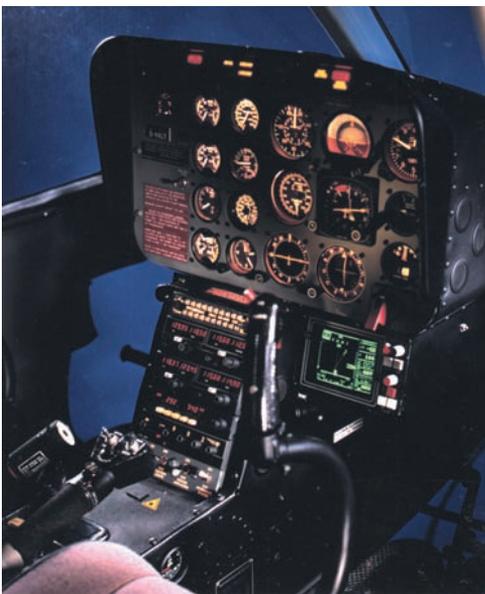


Abb. 13: Eine 5 Zoll *CDU* des *CCNS4*, eingebaut in einen Hubschrauber vom Typ *BELL Longranger*.

an das *CCNS* anschließen könne, einschließlich:

- gezielter Luftbildaufnahmen,
- Steuerdaten für Bildwanderungsausgleich,
- Drift Steuerung und
- Aufbelichtung von aktuellen Positions- und Managementdaten.

Kurzfristig wurde von Zeiss ein Demonstrations-Termin mit einer *Let-410* bei der Firma *Berliner Spezialflug* in Schönefeld vereinbart.

Die Firma *MAPS/Surdex* aus St. Louis/USA entschied sich daraufhin für die „gelbe Zeiss“-Kamera mit *CCNS* und stellte eigene Entwicklungen für ein Flugführungs- und Managementsystem auf der Basis *GPS/INS* ein.

Heute arbeiten weltweit mehr als 100 Luftbildfirmen erfolgreich mit *CCNS*.

11 *CCNS* und *AEROcontrol*

Beim 1982 durchgeführten Test Bodensee war bereits versucht worden, neben der genaueren Flugführung auch die Elemente der äußeren Orientierung zu bestimmen. Dies war für die Positionierung erfolgreich verlaufen (Beitrag *ACKERMANN* in diesem Heft), für die Winkelbestimmung leider noch nicht.

Prof. *CORTEN* vom *ITC Enschede* sah im *CPNS/CCNS* eine von ihm über viele Jahre propagierte Idee verwirklicht und war von der Möglichkeit, die Elemente der äußeren Orientierung direkt messen zu können, begeistert. Er trug seine Vorstellungen auf verschiedenen *ISPRS-Kongressen* unter dem generellen Thema „High Accuracy X, Y, Z Positioning in Flight by Means of the Computer Controlled Navigation System (*CCNS*), including Production of *Aerocontrol* to Replace Ground Control“ vor. Das von *CORTEN* geprägte Kunstwort *AEROcontrol* wurde der Produktname für *IGIs DGPS/IMU System*.

Mit kinematischem *GPS* wurde der Einsatz von inertialen Messsystemen interessant. Um bei großen Bildmaßstäben die mit 1 Hz ermittelte Position der *GPS-Flugzeuge*



Abb. 14: Das erste AEROcontrol-II System, basierend auf dem Litef LCR-88 Sensor mit dry-tuned Gyros.

Links: Sensorkopf einschließlich Elektronik
Rechts: Sensor und Elektronik getrennt.



Abb. 16: Ein komplettes CCNS4/AEROcontrol-II System neuester Bauart, die IMU montiert an einer LMK-1000 Luftbildkamera.

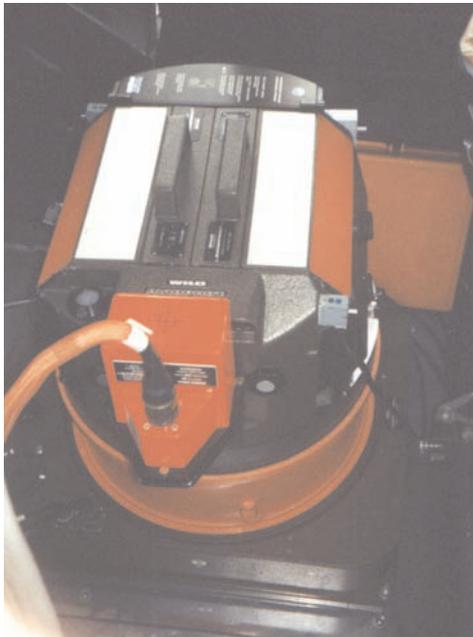


Abb. 15: RC30 mit IGLs AEROcontrol-IIb Sensorkopf.

antenne besser interpolieren und auf das Kameraprojektionszentrum übertragen zu können, wurde eine inertielle Messeinheit (IMU) fest mit dem Flugzeug verbunden, um die Hebelarmkorrektur durchzuführen. Als dies erfolgreich arbeitete, lag es nahe, die IMU direkt mit der Kamera zu verbind-

den, um auch die drei Winkel zu bestimmen. Nur der IMU-Sensor einschließlich Elektronik, war zu groß.

Nachdem es gelang, den Sensor von der Elektronik zu trennen, war der Weg frei für die Montage an der Kamera. Dieses System zur direkten Bestimmung der Elemente der äußeren Orientierung, basierend auf dry-tuned Gyros, wurde erstmals 1996 auf dem ISPRS-Kongress in Wien auf dem Stand der Firma Hansa Luftbild, montiert an einer RMK-TOP, vorgestellt.

Bei dem ISPRS-Kongress 2000 in Amsterdam konnte bereits ein AEROcontrol System mit neuer IMU, basierend auf faser-optischen Kreiseln, präsentiert werden. Gewicht und Volumen waren um ca. 70% gesenkt, dies bei verbesserter Messgenauigkeit (CRAMER 2001, KREMER 2001 & 2002, SUJEW 2002).

12 Sensor Management für das deutsche OPEN SKIES Flugzeug

Während der Tagung der 4. KSZE-Folgekonferenz zur Sicherheit und Zusammenarbeit in Europa im März 1992 in Helsinki wurde der Vertrag über den *Offenen Himmel* unterzeichnet (PIB 1992). Er erlaubte es dem Osten, im Westen *legale Spionage* auszuüben und dem Westen, im Osten entsprechende Inspektionsflüge durchzuführen. Für diesen *Offenen Himmel* sollte im wiedervereinigten



Abb. 17: Das deutsche OPEN SKIES Flugzeug, eine Tupolew TU-154M

Deutschland ein früheres VIP-Flugzeug von Erich Honecker, eine Tupolew Tu-154M, mit Sensorik ausgerüstet werden.

Für die erste Fähigkeit (OSEF) stellte Zeiss Oberkochen drei digitale Kamerasysteme VOS-60 und einen modularen Laser (MOLEM) zur Messung der Höhe über Grund sowie Carl Zeiss Jena drei LMK-2015 Kameras zur Verfügung. IGI wurde mit der Entwicklung des Sensor-Management-Systems und der Sensor-Integration betraut. Auch bei der Verwirklichung des realen Konzeptes (OSRK) mit insgesamt 11 Sensoren wurde IGI herangezogen.

Das OSRK Sensorkonzept bestand aus:

- 1 × ZENIT A-84 Panoramakamera,
- 3 × Carl Zeiss Jena LMK-2015 Messkamera (OSEF),
- 3 × Zeiss Oberkochen VOS-60, video-optischer Sensor (OSEF),
- 2 × IRLS, IR Line-Scanner,
- 1 × ROSSAR, Russian Open Skies Synthetic Aperture Radar und

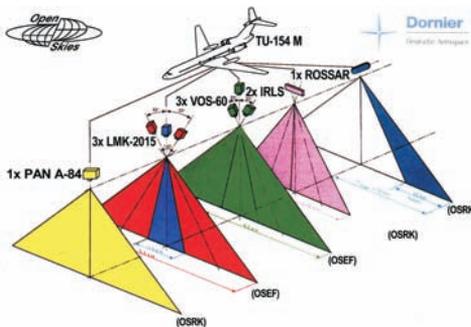


Abb. 18: Sensoren des deutschen OPEN SKIES Flugzeuges



Abb. 19: Das von IGI entwickelte und gebaute Bediengerät BDG A-84 für die russische ZENIT A-84 Panoramakamera.

- 1 × Bestimmung der Höhe über Grund Zeiss MOLEM Laser (OSEF), Radar.

Zur Steuerung der Panoramakamera musste zusätzlich ein neues Bediengerät BDG A-84 entwickelt und gebaut werden. Auch diese Aufgabe wurde IGI übertragen.

Bei der Abnahme dieses Gerätes in der Firma ZENIT in Krasnogorsk/Moskau, kam es zu einem netten Zwischenfall. Nach Anschluss unseres BDG A-84 fing die Panoramakamera zur Überraschung der russisch/deutschen Abnahmekommission sofort an zu arbeiten, stoppte aber nach drei Aufnahmen. Es stellte sich heraus, dass das Interface-Protokoll auf russischer Seite geändert worden war, ohne IGI zu informieren.

Nach Diskussion erklärte sich Fa. ZENIT bereit, das Protokoll wie vereinbart zu realisieren und am nächsten Tag einen neuen Abnahmetest durchzuführen. Plötzlich begann die Kamera wieder zu laufen, ohne nach drei Aufnahmen zu stoppen. Die Überraschung war groß. Unser Ingenieur hatte das Programm auf der Bediengerät-Seite angepasst. Alle waren froh, obwohl die russische Seite meinte, dies sei aber keine wissenschaftliche Arbeit, für die benötigt man mehr Zeit!

Für das deutsche OPEN SKIES Flugzeug und seine Besatzung endete ein reiner Transportflug nach Südafrika leider tragisch. Die Tupolew stieß am 13. September 1997 über

dem vom Luftverkehr nahezu freien Südatlantik vor Namibia mit einem amerikanischen Transportflugzeug zusammen. Es gab keine Überlebenden. GPS hatte seinen Tribut gefordert. Beide Flugzeuge hatten die gleichen Waypoints und die gleiche Flughöhe benutzt.

13 Neue Aufgaben

Das neue Jahrhundert hat das Zeitalter der digitalen Fotografie eingeläutet. Auf dem Amateursektor wird der Anteil digitaler Kameras für dieses Jahr auf 80 % geschätzt. Für die kommenden Jahre kann eine ähnliche Entwicklung auch für das Gebiet der Luftaufnahmen erwartet werden. Nach ersten Versuchen der führenden Hersteller von Luftbildkameras, die digitale Technik einzuführen, könnten in diesem Jahr Kameras der zweiten Generation angeboten werden (GRUBER et al., in diesem Heft). Preis und Leistung müssen zusammen passen. Wie IGI selbst erlebt hat, muss auf dem digitalen Sektor alle vier Jahre mit einer neuen Technikgeneration gerechnet werden. Also müssen sich digitale Kameras in vier Jahren abschreiben lassen und in der Zwischenzeit noch Geld verdienen.

Aus IGIs Sicht kommt der Flugplanung im Büro und der Ausrüstung des Flugzeuges oder Hubschraubers mit hochwertiger Technik eine immer größere Bedeutung zu. Der Flugbetrieb wird in der nahen Zukunft Aufgaben übernehmen, die heute noch dem Außendienst bzw. dem Büro vorbehalten sind. Mit GPS/Galileo können Positionsgenauigkeiten von 5 cm und besser erwartet werden, die inertielle Meßtechnik nähert sich der $1/1000^\circ$ Grenze für die Bestimmung von Phi und Omega. Es ist nur noch eine Frage der Zeit, wann der automatischen Aero-triangulation dann nur noch die – dennoch wichtige – Rolle der Prüfung/Kontrolle der Ergebnisse zufällt. Orthophotos werden innerhalb von Tagen, eventuell Stunden, nach der Befliegung zur Verfügung stehen.

Mit *WinMP* und *CCNS/AEROcontrol* sind für Flugplanung und Flugführung sowie der Bestimmung der Elemente der äußeren Orientierung die erforderlichen Werk-

zeuge vorhanden. Über die *MODE* und *PAGE* Funktionen des *CCNS* können zusätzlich noch Kontroll- und Managementfunktionen für die digitale Kamera oder sonstige Sensoren übernommen werden.

Bei der Arbeit mit GPS/IMU Systemen werden die Elemente der äußeren Orientierung direkt bestimmt. Es wird davon ausgegangen, dass die innere Orientierung der Kamera stabil ist. Dass dies nicht der Fall ist, wurde schon vor Jahrzehnten durch KUPFER (1971) und MEIER (1978) vorgetragen und es wurden praktische Tests gefordert. Falls sich also die Kamera-Parameter ändern, hat das eine direkte Auswirkung auf die Bestimmung der Höhen. Diesem Umstand muss, für bestimmte Vermessungsaufgaben, zur Zeit noch mit einem Kalibrierfeld im Operationsgebiet oder durch Verarbeitung der mit GPS/IMU ermittelten EO-Parameter in einer Blockausgleichung mit wenigen Passpunkten Rechnung getragen werden.

Die direkte Bestimmung der EO-Parameter mit GPS/IMU Gerät erfolgt in WGS 84 Koordinaten. Die Übertragung dieser Werte in Landeshöhen bereitet in vielen Ländern noch Schwierigkeiten. Auch auf diesem Gebiet ist noch viel zu tun.

In den vergangenen 25 Jahren konnten von IGI mehrere Beiträge zur Verbesserung der Geräteausstattungen, beim photogrammetrischen Bild- und sonstigen Sensorflug, beim Sensormanagement und bei der Datengewinnung, sowie für die Bestimmung der EO-Parameter, geleistet werden. Man kann gespannt sein, was die nächsten 25 Jahre bringen werden.

Literatur

- ACKERMANN, F., 1983: Use and Benefits of X, Y and delta Z Auxiliary Data for Aerial Triangulation, Results of the Test Mission „Boden-see“ 1982. – IGI Workshop, Proceedings, Hilchenbach, pp. 28–41.
- ACKERMANN, F., 1989: Kinematische GPS Positionierung in der Photogrammetrie. – *Ortung und Navigation*, **30** (3): 389–401.
- ARNHOLD, H. D. et al., 1993: New Results from Photoflights with GPS. – In: FRITSCH & HOBBIE (eds.): *Photogrammetric Week 93*, Wichmann, Karlsruhe, pp. 53–61.

- BACHEM, H.CH., 1985: Antarktis 1984/85, Aeromagnetik über dem Nord-Viktoria-Land. – PRAKLA-SEISMOS Report (1985) 1 + 2: 44–58
- BÄUMKER, M. & GRIMM, A., 1994: New Possibilities on Guidance, Positioning and Management for Aerial Survey Flight Missions. – Proceedings of the 8th International Flight Inspection Symposium, Denver, CO, USA, pp. 9–20.
- BECK, F., 1992: Flug zum Südpol. – Aviatic Verlag, Planegg.
- BEUMELBURG, J. et al., 1982: CPNS – Computer-controlled Photo Navigation System. – International Archives of Photogrammetry, **24** (1): 147–154.
- BEUMELBURG, J. et al., 1983: CPNS – Computer-controlled Photo Navigation System, New Aspects in Aerial Surveying. – IGI-Workshop, Proceedings, Hilchenbach, pp. 1–27.
- BROSSIER, F., 1980: Communication sur l'Emploi du Système Trident l'IGN. – International Archives of Photogrammetry, Vol. **23**, Part B1: 15–24.
- BRUNTHALER, F., 1984: Present Status of Orthophotography. – Proceedings of the 39th Photogrammetric Week at Stuttgart University, Institut für Photogrammetrie der Universität Stuttgart, Heft 9.
- CORTEN, F.L.J.H., 1959/1960: Survey Navigation and Determination of Camera Orientation Elements. – Photogrammetria, **16** (4): 251–281.
- CORTEN, F.L.J.H., 1984: Applications of Navigation Systems and Sensor Orientation Systems in Survey Navigation, Aerial Triangulation and in Establishment of Control. – International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. **25**, Part A1: 26–36.
- CRAMER, M. (2001): Performance of IGI AEROcontrol-II GPS Inertial System Final report. – Institute for Photogrammetry, University of Stuttgart, www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/2001/cramer_igi01.pdf
- GRIMM, A. & HEIMES, F.J., 1984: CPNS – Computer-controlled Photo Navigation System – New Aspects for Aerial Survey. – International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. **25**, Part A1: 81–92.
- GRIMM, A., 1992: Computer-Controlled Navigation System/General Positioning System (CCNS/GPS). Ein Führungs-, Positionier- und Managementsystem für Fernerkundungs-Flüge. – Ortung und Navigation, **33** (1): 89–99.
- GRIMM, A., 1992: LORAN-C und GPS, zwei Ortungssysteme für Europa. – Zeitschrift für Satellitengestützte Positionierung, Navigation und Kommunikation, **1** (4): 126–131.
- GRUBER, M. et al., 2003: Paradigmenwechsel in der Photogrammetrie durch digitale Luftbildaufnahme? – Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation **2003** (4).
- HEIMES, F.J., 1986: Precision Aircraft Guidance in Antarctica. – Proceedings of the 40th Photogrammetric Week at Stuttgart University, Institut für Photogrammetrie der Universität Stuttgart, Heft 11.
- HEIMES, F.J., 1986: Computer-kontrollierte Navigation für aeromagnetische Vermessungsflüge bei der Antarktisexpedition GANOVEX IV im Südsommer 1984/85. – Bildmessung und Luftbildwesen, **54** (2): 92–99.
- HERMS, P., 1991: Einsatz von CCNS/GPS und RMK TOP, Neue Erfahrungen und Überlegungen zur Bildflugnavigation. – Vorträge der 43. Photogrammetrischen Woche an der Universität Stuttgart, Institut für Photogrammetrie der Universität Stuttgart, Heft 15.
- HUEP, W., 1985: Positionsbestimmung im Küstenbereich. – In: PELZER, H. (ed.): Geodätische Netze in Landes- und Ingenieurvermessung II. – Konrad Wittwer, Stuttgart, S. 693–724.
- IGI, 1983: Proceedings, Workshop held on Computer-Controlled Survey Navigation and Collection and Use of Auxiliary Data for Aerial triangulation at Siegerland Airport, 10th/11th June 1983, Hilchenbach.
- KREMER, J., 2001: CCNS and AEROcontrol, Products for Efficient Photogrammetric Data Collection. – In: FRITSCH & SPILLER (eds.): Photogrammetric Week 2001. – Wichmann Verlag Heidelberg, pp. 85–92.
- KREMER, J., 2002: CCNS/AEROcontrol – an Integrated GPS/Inertial System for Direct Georeferencing of Airborne Image Data. – In: SORG, H. (ed.): Symposium Gyro Technology 2002. – Universität Stuttgart, Institut A für Mechanik & DGON; Stuttgart, pp. 16.0–16.9.
- KREMER, J. & GRIMM, A., 2002: The Integrated CCNS/AEROcontrol System: Design and Results. – In HEIPKE, JACOBSEN & WEGMANN (eds.): Integrated Sensor Orientation. – Test Report and Workshop Proceedings, OEEPE publication no. **43**: pp. 189–196.
- KUPFER, G., 1971: Zur Geometrie des Luftbildes. – DGK Reihe C, Heft 170, Beck, München.
- MEIER, H.K., 1978: Verzeichnung, Kammerkonstante und Fokussierung von Luftbildkameras unter dem Einfluß bildflugspezifischer Umweltbedingungen. – Bildmessung und Luftbildwesen **46** (6): 193–198.
- N.N., 1987: Ganovex IV and Trident III in the Icy Wastes TELONDE (magazine of Thomson-CSF, Paris) No. 6/March, pp. 45–48.

- O'BRIAN, C.I.M., 1984: Computer Controlled Air Survey Navigation. – Photogrammetric Record (London), **63** (11): 319–321.
- PAPE, E., 1988: Gedanken zur Anwendung der Photogrammetrie im amtlichen Vermessungswesen. – Nachrichten aus dem öffentlichen Vermessungswesen NRW **21** (2): 79–86.
- PIB, 1992: Presse- und Informationsamt der Bundesregierung: Vertrag über den offenen Himmel. – Bulletin Nr. 48/S. 433 vom 08.05.92.
- READ, R. E., 1983: CPNS as seen by an Air Survey Navigator. – IGI Workshop, Proceedings, Hilchenbach, pp. 48, 49.
- R. G., 1985: Do-228s return from Antarctica. – Aviation Convention News, Midland Park, N.J., USA, March 1, 1985.
- SUJEW, S. et al., 2002: GPS/INS-Systeme im Einsatz mit der HRSC – Vergleich der Systeme AP-PLANIX POS/AV-510 und IGI AEROcontrol-Iid – Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation, **2002** (5): 333–339
- WINKELMANN, G., 1977: Data Aquisition for Remote Sensing. – Proceedings of the 36th Photogrammetric Week at Stuttgart University, Institut für Photogrammetrie der Universität Stuttgart, Heft 4.
- ZORN, H.C., 1981: The Application of Programmable Pocket Calculators for Computations During Survey Flights. – ITC Journal **1981** (3): 308–333.

Anschrift des Verfassers:

ALBRECHT GRIMM
c/o IGI mbH, Langenauer Str. 46
D-57223 Kreuztal
Tel: +49-2732-5525-0
Fax: +49-2732-5525-25
e-mail: a.grimm@igi-ccns.com

Manuskript eingereicht: Mai 2003

Angenommen: Mai 2003

Mit dem „Bodensee-Test“ 1982 fing es an – Eine Erinnerung zur Entwicklung der Kamera-Positionierung für die Aerotriangulation

FRIEDRICH ACKERMANN, Stuttgart

Keywords: aerial photography, camera orientation data, airborne radio location, aerial triangulation, integrated block adjustment

Zusammenfassung: Anlässlich von Jubiläen kann es interessant sein, an historische Arbeiten zu erinnern, die am Anfang einer Entwicklungslinie standen, die sich erst später unter besseren technologischen Voraussetzungen durchsetzen sollte. So wird hier an den „Bodensee-Test“ von 1982 erinnert, den ersten Versuch auf dem Weg zur heutigen Kamera-Positionierung mit GPS für die Aerotriangulation.

Summary: *It started with the „Bodensee-Test“ 1982 – A recollection of the beginning of camera positioning for aerial triangulation.* Jubilees are an occasion to remember certain historical events at the beginning of developments which would be realized only later, under better technical conditions. Here, the „Bodensee-Test“ of 1982 is recalled, an initial experiment to use airborne camera positioning by radio location for aerial triangulation. It marks the take-off towards today's GPS application for aerial triangulation.

1 Hilfsdaten für die Kamera-Orientierung

Die Luftbild-Photogrammetrie hat fast von Anfang an nach Möglichkeiten gesucht, die Kamera-Orientierung im Flug zu erfassen. Die Bemühungen liefen seit den 20er und 30er Jahren des letzten Jahrhunderts unter dem Stichwort der sog. Hilfsdaten für die Kamera-Orientierung. Es handelte sich damals um Statoskop, Horizontbild-Kamera, Sonnenperiskop und auch schon um Kreiselssysteme. Sie konnten sich aber nicht in größerem Umfang durchsetzen. Ähnliches gilt für die Radio-Positionier-Systeme der 50er Jahre vor allem aus Kanada. Diesen Systemen blieb aus heutiger Sicht ein größerer Durchbruch verwehrt, weil ihre Messungen einerseits weder absolut noch relativ genau genug waren und andererseits noch keine Möglichkeit bestand, sie rechnerisch in die Aerotriangulation einzubinden.

Eine gewisse Ausnahme bildeten das in den 60er Jahren wiederbelebte Statoskop zur barometrischen Differenz-Höhenmessung im Flug und der ebenfalls barometrisch gestützte Airborne Profile Recorder (APR). Beide Systeme waren auf die Höhenbestimmung der Projektionszentren bzw. von Geländepunkten ausgerichtet. Höhen und Höhengenaugigkeit stellten damals bis in den Bereich großmaßstäbiger Kartierungen hinein deutlich höhere Anforderungen und waren vordringlicher als die Lage-Positionierung.

2 Blockausgleichung mit Hilfsdaten

Die nach gewissen Vorläufern etwa ab 1970 aufkommende simultane rechnerische Blockausgleichung ganzer Bildverbände bedeutete für die Praxis der Photogrammetrie einen großen Schub. Sie führte zu ganz erheblicher Einsparung von Passpunkten und zu deutlich gesteigerter absoluter wie innerer Ge-

nauigkeit, und sie bestimmte damit für zwei Jahrzehnte das Leistungsniveau der Photogrammetrie. Allerdings trat dabei die Frage der Hilfsdaten irgendwie in den Hintergrund, insbesondere bei der Bündelmethode, die sich mehr als 20 Jahre lang nicht darum kümmerte. Die Gründe seien hier dahingestellt. Dabei war die mathematische Integration verschiedener zusätzlicher Daten und Bedingungen bei den speziellen Bündel-Programmen von D. BROWN, u.a. zur Vorbereitung der Apollo-Mondlandungen, schon sehr weit getrieben gewesen (BROWN 1975). Der Ansatz wurde aber nicht in die normale Aerotriangulation übernommen, obwohl die gemeinsame Blockausgleichung dadurch kaum erschwert worden wäre.

Eine wesentliche Ausnahme bildete das Programm Pat-M-43 der Universität Stuttgart für die Blockausgleichung mit unabhängigen Modellen, das Statoskop- wie auch APR-Daten als die damals einzigen in der Praxis verfügbaren und speziell auf die Höhen ausgerichteten Hilfsdaten in die simultane Ausgleichung einbeziehen konnte. Dieses Verfahren der Blockausgleichung mit Hilfsdaten war wirksam und, soweit eingesetzt in der Praxis, auch recht erfolgreich. Insbesondere konnte nachgewiesen werden, dass (mit Hilfe von linearen Transformationsparametern für die unbekannte isobare Referenzfläche) die Höhengenaugigkeit der Statoskop-Messungen im Bereich von 1 m oder besser lag und die ausgeglichenen Blöcke an Höhengenaugigkeiten bis 0,5 m aus Flughöhen von 3000 bis 4000 m herankamen (KLEIN 1976, ACKERMANN & SCHNEIDER 1983). Damit wurden für mittlere Bildmaßstäbe passpunktlose Überbrückungsdistanzen von 100 oder 200 km möglich. Dennoch hat sich das Verfahren nicht verbreiten können, vor allem weil die Statoskop-Geräteentwicklung nicht nachgezogen hat und die Verwendung des APR auf wenige Länder und kleinmaßstäbige Aufnahmen beschränkt blieb.

3 Systeme zur Lage-Positionierung von Flugzeug und Kamera

In den 70er Jahren wurden über Statoskop und APR hinaus von der Seite der photogrammetrischen Auswertung her keine weiteren Anforderungen an Kamera-Orientierungsdaten gestellt. Die erfolgreiche Entwicklung der Blocktriangulation und ihre Verfeinerung durch Selbstkalibrierung schien allen Anforderungen zu genügen. Die direkte Messung, insbesondere von Positionsdaten, blieb aber von der Seite der Bildflug-Navigation her akut. Im Hinblick auf gezielte Befliegungen vor allem für die direkte Orientierung von Orthophotos war damit von Anfang an die Vorstellung von der Messung möglichst aller Parameter zur Positionierung und zur Richtungs-Orientierung der Luftbilder verbunden. Solche Vorstellungen lagen Systemen wie PICS (Photogrammetric Integrated Control System) von Litton (BRULAND 1982) oder dem auf Echtzeit ausgerichteten experimentellen US/ANQ-28 System (DI CARLO & EAKIN 1965) zugrunde. Von letzterem wurde sogar erwartet, dass es leistungsfähig genug wäre, mit seinen Orientierungsdaten die Aerotriangulation zu ersetzen. Diesen höchst aufwändigen Bildflug-Navigations-Systemen der 70er Jahre war kein besonderer Erfolg beschieden, und sie sollen hier nicht weiter kommentiert werden. Das Hauptproblem bestand in der sehr ungünstigen Fehlerfortpflanzung bei der alleinigen Verwendung von Inertialsystemen (INS bzw. IMU) zur Gewinnung von Positionsdaten.

Hier soll mit dem Thomson-CSF Trident System an eine Entwicklung aus Frankreich vom Anfang der 80er Jahre erinnert werden. Es war ursprünglich für die genaue Navigation von Schiffen konzipiert, wurde aber in der Version Trident III auch für die X,Y-Positionierung von Luftfahrzeugen anwendbar (BALSAN & DUMAS 1983). Die Firma IGI mbH, Hilchenbach, integrierte dieses System in ihr CPNS (Computer-controlled Photo Navigation System), primär für Navigationszwecke und kontrollierte Bildflüge (BEUMELBURG, GRIMM & HEIMES 1983). Das Trident III System bestand im Prinzip

aus einem Sender/Interrogator im Flugzeug, der amplituden-modulierte Radio-Signale mit der Trägerfrequenz von 1219 MHz ($\lambda = 0,25$ m) bzw. im 420–450 MHz Band ($\lambda = 0,71$ – $0,67$ m) abstrahlte, die von stationären Transpondern am Boden umgesetzt und zurückgestrahlt wurden, um vom Empfänger im Flugzeug empfangen, identifiziert und registriert zu werden. Andere Frequenzbereiche (im 200–300 MHz Band) waren ebenfalls möglich. Die Reichweite war damals auf Entfernungen bis zu 260 km ausgelegt. Die Positionen von mindestens 3 Transpondern mussten geodätisch bekannt sein. Sie bildeten das Referenz-Koordinatensystem für die Positionierung des Flugzeugs. Ein Computer an Bord verarbeitete die Signale laufend durch Trilateration (mit Korrektur der Schrägentfernungen) zu Positionsangaben, die an den IGI Navigationsrechner übergeben wurden und/oder zur späteren Ableitung der Kamerapositionen registriert werden konnten. Das IGI-System konnte zur Flugplanung und zur kontrollierten Navigation mit gezielten Luftaufnahmen ausgebaut werden. Für die Navigation in Echtzeit wurde eine Positionsgenauigkeit von 20 m angegeben. Die Messgenauigkeit für die Entfernungen lag absolut bei 3 m, relativ bei 1 m, und mit 4 gut verteilten Transpondern wurde eine Systemgenauigkeit von 1 m erwartet.

4 Der Bodensee-Flugtest 1982 zur Kamera-Positionierung

4.1 Die Befliegung

Mit den genannten Genauigkeiten wurde das CSF Trident III System über die Navigationsanwendung hinaus interessant für die Kamera-Positionierung im Zusammenhang mit Aerotriangulation und integrierter Blockausgleichung. Aus der Sicht der Aerotriangulation bzw. speziell der kombinierten Blockausgleichung war schon immer klar gewesen (besonders nach den Erfahrungen mit dem Statoskop), dass auch X, Y-Kamera-Positionen, als zusätzliche gewichtete Beobachtungen in die Blockausgleichung eingebracht, sehr wirksam sein und eine weitere Ausdünnung der Lagepasspunkte erlauben würden, selbst wenn die Zusatzdaten nicht allzu genau wären.

Das Institut für Photogrammetrie der Universität Stuttgart bekam seinerzeit im nachhinein Zugang zu den Positionierungsdaten und den Luftbildern eines Versuchsfluges, der auf Initiative der IGI mbH, Hilchenbach, 1982 von der DLR im Bereich des westlichen Bodensees mit Verwendung des Trident III Systems durchgeführt worden war. Von den 4 Transpondern befand sich einer in Konstanz am Rand des Befliegungsgebietes. Die 3 anderen waren je etwa 80 km entfernt in einem Sektor nordwestlich bis

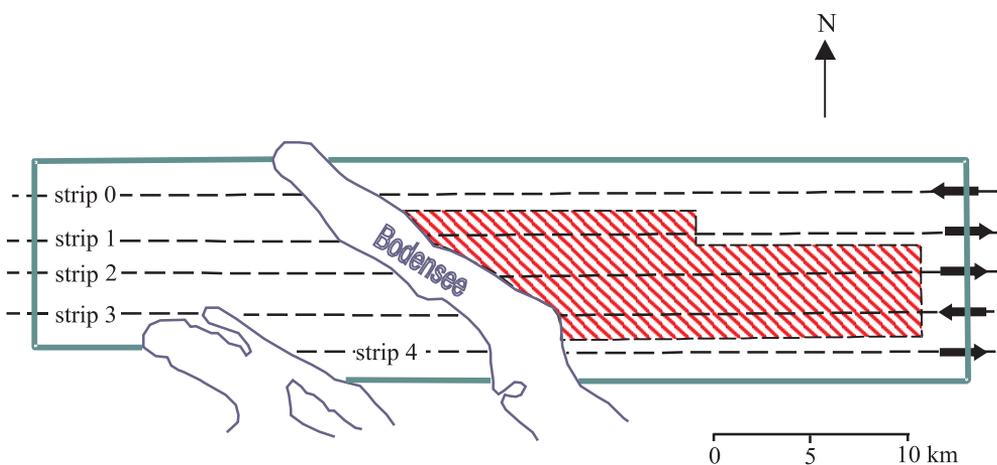


Abb.1: Bildflug westlicher Bodensee 1982, 5 Streifen, 223 Bilder, Bildmaßstab 1: 16000, bearbeiteter Block 3 Streifen, 56 Bilder.

nordöstlich vom Fluggebiet verteilt. Leider wurden die Transponder nicht geodätisch eingemessen, vielmehr ihre Positionen nur aus der Topographischen Karte graphisch abgegriffen, was insgesamt höchstens eine Genauigkeit im 20 m Bereich erwarten lassen konnte. Die Luftbilder wurden mit dem Prototyp der damals neuen RC 10 A Kamera von Wild im Bildmaßstab 1:16000 ($h = 2450$ m) aufgenommen. Wir waren leider in die Planung des Fluges nicht einbezogen, der nur auf die Bildflug-Navigation ausgerichtet war. Das westliche Drittel des aus 5 parallelen Streifen und 224 Bildern bestehenden Bildblocks war durch die breite Wasserfläche des Überlinger Arms des Bodensees völlig abgetrennt und somit für unsere Untersuchungen unbrauchbar (s. Abb. 1). Dennoch bildeten die 3 zentralen Streifen des östlichen Teils mit insgesamt 56 Bildern einen für die Untersuchung ausreichenden Bildverband, in dessen Gebiet und darauf beschränkt 34 signalisierte Lagepasspunkte und 380 topographische Höhenpasspunkte zur Verfügung standen. Außerdem waren in diesem Bereich die Verknüpfungspunkte für die Aerotriangulation, durchschnittlich 10 pro Bildpaar, im Gelände signalisiert.

4.2 Aerotriangulation und Genauigkeitsuntersuchung

Mit den Luftbildern wurde eine Aerotriangulation konventioneller Art nach der Methode der unabhängigen Modelle durchge-

führt. Die Messungen erfolgten mit dem analytischen Plotter Zeiss Planicom C 100 im Stereokomparator-Modus. Zur Blockausgleichung wurde das Programm PAT-M-43 benutzt, das die mit dem Trident III System gemessenen X, Y-Kamera-Positionen unmittelbar als gewichtete zusätzliche Beobachtungen einzuführen erlaubte. Allerdings konnten systematische Fehler noch nicht in der Ausgleichung kompensiert werden. Es gab damals noch kein Programm, das allgemein Positionsdaten einschließlich der Korrektur systematischer Fehler hätte verarbeiten können. Die Aerotriangulation ergab für damaliges Bildmaterial und unabhängige Modelle erwartungsgemäße Ergebnisse:

$$\sigma_{0\text{Lage}} = 0,11 \text{ m} = 7 \mu\text{m};$$

$$\sigma_{0\text{Höhe}} = 0,20 \text{ m} = 0,08\% h = 12 \mu\text{m}.$$

Die Genauigkeitsuntersuchung hatte zwei sich ergänzende Zielsetzungen. Zunächst wurde eine normale Blockausgleichung ohne die Hilfsdaten unter Verwendung aller gegebenen geodätischen Punkte als Passpunkte durchgeführt. Das Ergebnis war ein gut fixierter photogrammetrischer Block, dessen Projektionszentren etwa auf 30 cm genau waren. Mit diesen durch die Blockausgleichung ermittelten Projektionszentren wurden die Ergebnisse der Trident Positionierung verglichen (s. Abb. 2). Dabei stellte sich zunächst an allen Projektionszentren eine praktisch konstante Differenz von 17,9 m heraus, die zweifellos im Wesentlichen von der mangelhaften geodätischen Referenz der Transponder verursacht war.

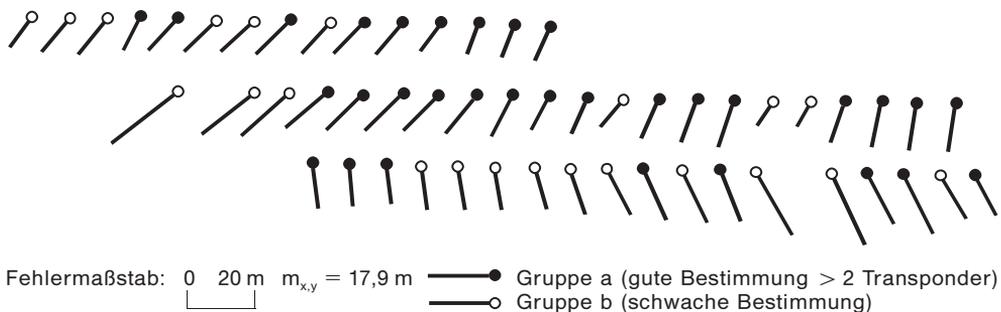


Abb. 2a: Differenzen der Kamerapositionen zwischen der Trident-Bestimmung und der Bestimmung im photogrammetrischen Block.

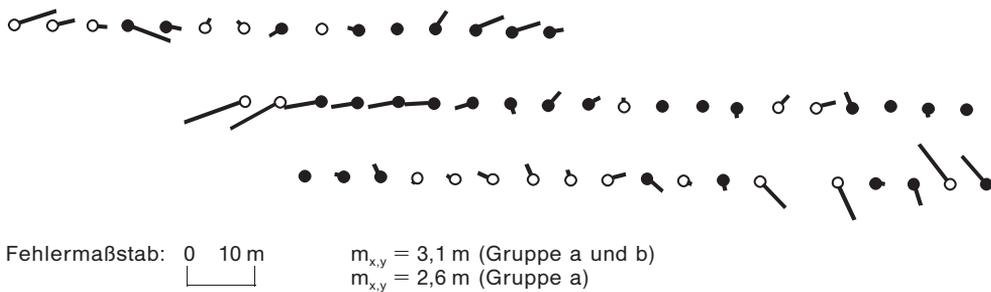


Abb. 2b: Differenzen nach Korrektur der systematischen Fehler.

Weiterhin war ein kleinerer, von der Flugrichtung abhängiger systematischer Fehler zu erkennen. Er war in erster Linie dadurch zu erklären, dass keine Reduktion der Trident Positionierungsdaten von der Flugzeug Antenne auf die Kamera stattgefunden hatte. Diese systematischen Fehler hatten offensichtlich mit der Performance des Systems nichts zu tun und wurden deshalb für die weitere Untersuchung als nicht systeminhärent weggerechnet. Danach verblieben quadratische Koordinaten-Differenzen an den Projektionszentren von 3,1 m bzw. von 2,6 m für die von mehr als 2 Transpondern abgeleiteten Positionen. Damit war zunächst bewiesen, dass die Systemgenauigkeit jedenfalls in einem für die Photogrammetrie mit Aerotriangulation höchst interessanten Bereich lag.

Im zweiten Teil der Untersuchung wurden die (um die großen systematischen Effekte korrigierten und auf die Bildorte interpolierten) X, Y-Messungen des Trident Systems als entsprechend gewichtete zusätzliche Beobachtungen in eine integrierte Blockausgleichung eingebracht, die sich auf nur 4 Lage-Passpunkte in den Blockecken stützte. Die übrigen bekannten geodätischen Punkte wurden jetzt als Vergleichspunkte zur Abschätzung der Genauigkeit des ausgeglichenen Blocks verwendet. Im Ergebnis wiesen die quadratischen Koordinaten-Differenzen an den 30 Check-Punkten eine mittlere Genauigkeit von 23 cm in X- (Hoch-) und von 34 cm in Y- (Rechts-) Richtung aus. Dieses Ergebnis bestätigte eindeutig die Wirksamkeit der Methode. Allerdings bleibt anzumerken, dass wegen des relativ großen Bild-

maßstabs und der schwachen Gewichtung der im Verhältnis ungenauen Hilfsdaten die Blockausgleichung ohne die Zusatzmessungen nicht sehr viel ungenauer ausgefallen wäre.

Als Ergänzung wurde deshalb mit den gleichen Daten auch noch eine Blockausgleichung ganz ohne Lage-Passpunkte durchgerechnet. In diesem Fall bezog sich das Ergebnis auf das durch die Transponder Positionen definierte Referenz System. Sie ersetzen sozusagen die konventionellen Passpunkte, die dabei vollständig weggelassen werden konnten. Die quadratischen Differenzen an den 34 Vergleichspunkten ergaben für die mittlere Genauigkeit des so ausgeglichenen Blocks 36 cm in X- und 53 cm in Y-Richtung. Die Wirksamkeit der Einbeziehung der Kamera-Positionsdaten in die Blockausgleichung war damit erneut bestätigt. Auf eine genauere Analyse braucht hier nicht mehr eingegangen zu werden.

5 Bewertung

Das CSF Trident III System hat durch das IGN, Paris, und die IGI in der Photogrammetrie zwar für Navigationszwecke eine gewisse Anwendung erfahren (z.B. in der Antarktis). Für Kamera Positionierung zur Unterstützung der Aerotriangulation ist es, soweit bekannt, nie mehr eingesetzt worden. Insofern war der Bodensee-Test wohl der erste und einzige seiner Art.

Dieser Test war in seinen Ergebnissen trotz der gegebenen Einschränkungen sehr überzeugend. Es wurde eindeutig gezeigt, dass auch X, Y-Hilfsdaten für die Kamera-

Orientierung sehr wirkungsvoll in Verbindung mit Aerotriangulation durch kombinierte Blockausgleichung eingesetzt werden können und, dass die erreichbare Genauigkeit derartige Systeme äußerst wirtschaftlich machen könnte. Dabei beruht der wesentliche Effekt auf der Integration mit Aerotriangulation und Blockausgleichung, als die damit erreichbare Blockgenauigkeit deutlich besser ist als die individuelle Genauigkeit der Hilfsdaten selbst. Gleichzeitig wurde deutlich, dass systematische Fehler in Analogie zu den Erfahrungen mit dem Statoskop durch zusätzliche Parameter in der gemeinsamen Blockausgleichung modellierbar und korrigierbar sein würden.

Insofern bedeutete dieser erste Test einen konzeptionellen Durchbruch, und er hat die Verfahren methodisch vorbereitet, die erst ein gutes Jahrzehnt später mit der GPS Technologie erfolgreich umgesetzt werden konnten. Wenn man heute die damaligen Veröffentlichung liest (ACKERMANN 1982, 1984), ist man erstaunt, dass der heutige Status der Aerotriangulation mit und ohne Passpunkte schon vorweggenommen und konkret konzipiert war. Insofern kommt diesem Test als Vorläufer und Vorbereiter einer späteren Realisierung eine besondere Bedeutung zu, die mit den besseren technologischen Voraussetzungen des GPS heute den etablierten Leistungsstandard bildet.

6 Literatur

- ACKERMANN, F., 1982: Use and Benefits of X, Y, dZ Auxiliary Data for Aerial Triangulation – Results of the Test Mission „Bodensee“ 1982. – Proceedings Workshop at Siegerland-Airport, 10./11. Juni 1983, IGI mbH, S. 28–41.
- ACKERMANN, F., 1984: Utilisation of Navigation Data for Aerial Triangulation. – Presented Paper, Comm. III, ISPRS Congress, Rio de Janeiro, 1984, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXV, Part A3a: 1–9.
- ACKERMANN, F. & SCHNEIDER, W., 1983: Neue Ergebnisse zur Aerotriangulation mit Statoskop. – Bildmessung und Luftbildwesen, **51** (1): 21–37.
- BALSAN, H. & DUMAS, B., 1983: Trident III Radio Location System. – Proceedings Workshop at Siegerland-Airport, 10./11. Juni 1983, IGI mbH, S. 50–54.
- BEUMELBURG, J., GRIMM, A. & HEIMES, F. J., 1983: CPNS – The Computer-controlled Photo Navigation System. – Proceedings International Symposium, ISPRS Comm. I, Canberra Australia 1982, S. 147–154.
- BROWN, D. C., 1975: Bundle Adjustment with Strip- and Blockinvariant Parameters. – In: Proceedings of the ISP Commission III symposium held in Stuttgart, 2.–6. September 1974. – Deutsche Geodätische Kommission, Reihe B: Angewandte Geodäsie, Heft Nr. **214**: 54–65.
- BRULAND, R. V., 1982: Integrated Air Survey Navigation. – Proceedings 38. Photogrammetrische Woche, Institut für Photogrammetrie Stuttgart, Heft **8**: 59–72.
- DI CARLO, C. & EAKIN, N., 1965: Mapping and Survey System Geodetic AN/USQ-28. – Archives of Photogrammetry, **15** (3).
- KLEIN, H., 1976: Genauigkeit von Höhenblöcken mit gemeinsamer Ausgleichung von Statoskop- oder APR-Hilfsdaten. – Numerische Photogrammetrie (III), Institut für Photogrammetrie, Heft **1**: 5–16, Stuttgart.

Anschrift des Verfassers:

Prof. i. R. Dr.-Ing. FRIEDRICH ACKERMANN, Pfeilstraße 22, D-70569 Stuttgart
Tel.: 0711-68 46 11

Manuskript eingereicht: April 2003
Angenommen: Mai 2003

Cooper Aerial Survey's Precise Photo Positioning

GERALD COOPER, Retford, UK

Keywords: aerial survey, mission planning, mission execution, CCNS, WWMP

Summary: From the view of an aerial survey company the precision and reliability of the CCNS4 guidance and management system are explained.

Zusammenfassung: Die Präzisions-Photo-Positionierung der Firma Cooper Aerial Survey. Am Beispiel eines Bildflugprojektes wird die Präzision und Zuverlässigkeit des CCNS4 Flugführungs- und Management-Systems aus Anwendersicht dargestellt.

IGIs Computer Controlled Navigation System (CCNS4) and World Wide Mission Planning software (WWMP) have revolutionised aerial photography.



Two Cooper Aerial Survey *Commander* aircraft

An example of a simple mission for our company was to fly thousands of oil and gas installations throughout the Middle East. This required a customer specified single photo precisely positioned on each installation to within 1 metre. Project planning was carried out in the UK using WWMP. Local co-ordinate modules for WWMP were supplied by IGI and maps were supplied by the customer. Such varied inputs into the project, gave much opportunity for errors. However using the WWMPs quality control functions, the accuracy of the planning could be checked before mobilisation.

Whilst airborne the high resolution monitors of the CCNS4 allowed precise positioning of the platform during the data acquisition phase. For the pilot, the ability to see a range of useful information on the monitor eased the workload in the cockpit. This was of huge importance during operations in high density traffic areas where the *Time* and *Distance to End of Line* functions were critical to both pilot and air traffic controller.

Another very useful function was the ability to route direct to the start of the line over hundreds of miles of desert saving both time and valuable sun angle. Using *Zoom In* and *Zoom Out*, the lines could be flown to the required accuracy on a repeatable basis.

After each flight, the simple down-loading (post flight process) was achieved on a laptop computer, thus enabling the crew to observe, post flight, their progress on the project and check photo centre positions. The whole project was completed over a one month period with the software and hardware being 100% reliable throughout.

Due to the nature of the countries involved, the whole survey had to be completed before the films could be processed and checked. This placed a great deal of importance on the correct positioning of each

photo as the aircraft and crew had already returned to the UK by the time the films were processed. All positions checked out correctly, to the satisfaction of the customer.

In our opinion the product is excellent, and thus is used in all six of our aerial survey aircraft, including the two UK Ordnance Survey aircraft.

Address of the author:

GERALD COOPER, Chief Pilot
Cooper Aerial Surveys Ltd., Hangar 5
Gamston Airport, Retford DN22 0QL, UK
Tel.: 44-1777-839 440, Fax: 44-1777-839 410
e-mail: cas.uk@talk21.com

Manuskript eingereicht: April 2003
Angenommen: Mai 2003

Erfahrungen mit der direkten Georeferenzierung

MICHAEL CRAMER, Stuttgart

Keywords: GPS/inertial, direct georeferencing, integrated sensor orientation, long-term calibration

Zusammenfassung: Am Institut für Photogrammetrie (ifp) wurden in den vergangenen Jahren ausgiebige Untersuchungen zum Einsatz von integrierten GPS/Inertial-Systemen in der Aerophotogrammetrie durchgeführt. In diesem Artikel werden exemplarisch die Erfahrungen mit dem AEROcontrol-II-System vorgestellt. Dieses System wurde bereits zweimal unter gut kontrollierbaren Bedingungen im extra eingerichteten Testfeld Vaihingen/Enz auf sein geometrisches Genauigkeitspotenzial hin untersucht. Mit den bisher vorliegenden Daten der Testflüge konnten für GPS/Inertial-Positions- und Winkelbestimmung und die anschließende direkte Georeferenzierung hohe Genauigkeiten nachgewiesen werden. Diesen Ergebnissen aus derartigen speziellen Genauigkeitstests werden im zweiten Teil Resultate aus operationellen Einsätzen gegenübergestellt. Anhand dieser Daten werden auch erste Aussagen zur Langzeitstabilität der Kalibrierung eines Gesamtsystems im operationellen Umfeld abgeleitet.

Summary: *Experiences with direct georeferencing.* Within the last years extensive investigations were done at the Institute for Photogrammetry (ifp) using integrated GPS/inertial systems in aerial photogrammetry. This article focuses on the experiences with the AEROcontrol-II system, exemplarily. This system was already flown twice in well-controlled airborne environments in the especially designed test area Vaihingen/Enz to estimate its geometric accuracy performance. From the available test data material high quality results for GPS/inertial positioning and attitude determination and subsequent direct georeferencing are obtained. Besides the results from such evaluation tests the experiences from true operational flights are given in the second part of this paper. From such operational data set first remarks on the long term stability of overall system calibration in operational environments are possible.

1 Einleitung

Die direkte Bestimmung der Orientierung eines Flugzeug-getragenen Sensors durch geeignete integrierte GPS/Inertial-Systeme hat in den letzten Jahren in Forschung und Praxis einen bedeutenden Aufschwung erhalten. Dieses wird gefördert durch die prinzipielle Verfügbarkeit integrierter Systeme, die auch hohe photogrammetrische Genauigkeitsanforderungen erfüllen können. Damit können im Idealfall Sensordaten mit ausreichender Genauigkeit direkt georeferenziert werden. Darüber hinaus findet die GPS/Inertial-Technologie durch die zunehmende praktische Anwendung digitaler Aufnahmesysteme weitere Verbreitung. Ge-

rade für digitale Sensoren ist die direkte Bestimmung der Flugtrajektorie aus zweierlei Gründen wichtig: Die Daten digitaler Aufnahmesysteme stehen im Idealfall unmittelbar nach Befliegungsende für weitere Auswertungen zur Verfügung, wobei die Sensororientierung eine, vielleicht sogar die zentrale Komponente in der Prozesskette darstellt. Daher sollten für die schnelle Verarbeitung digitaler Daten ausreichende Informationen über die Sensororientierung zeitnah und direkt zur Verfügung gestellt werden können. Der zweite Punkt ergibt sich aus der Sensorgeometrie digitaler Aufnahmesysteme, die ihre Daten nach dem Pushbroom-Prinzip (z.B. digitale Zeilenbildkameras, Laserscanner) erfassen. Durch die

schwache Geometrie der erfassten Zeilen zueinander, was vor allem für hoch-dynamische Umgebungen einer photogrammetrischen Befliegung zutrifft, müssen für eine spätere effiziente Datenauswertung Zusatzinformationen über die Sensororientierung zur Verfügung gestellt werden. Dieser letzte Punkt war auch am Institut für Photogrammetrie das auslösende Moment für die intensive Beschäftigung mit integrierten GPS/Inertial-Systemen und deren Einbindung in das photogrammetrische Umfeld.

Erste Untersuchungen wurden dazu in einem gemeinsamen Test zusammen mit dem Department of Geomatics, Universität Calgary (UofC), Canada, im Jahre 1995 durchgeführt (ŠKALOUŠ et al. 1996). Fast zeitgleich fanden erste Testflüge mit dem Dreizeilensensor Digitale Photogrammetrische Ausstattung (DPA-Kamera, HOFMANN et al. 1993) statt. Während zunächst experimentelle Systeme untersucht wurden, lag anschließend der wesentliche Schwerpunkt auf der Evaluierung des geometrischen Genauigkeitspotenzials kommerzieller integrierter GPS/Inertial-Systeme in Kombination mit digitalen Zeilen- (HRSC-A, WEWEL et al. 1998) bzw. klassischen analogen Luftbildkameras. Die Historie der in den letzten Jahren unter Beteiligung bzw. Leitung des ifp durchgeführten Testflüge ist aus Tab. 1

ersichtlich. Parallel zu den am ifp durchgeführten Tests sind von der OEEPE (European Organization for Experimental Photogrammetric Research, jetzt EuroSDR, European Spatial Data Research) umfangreiche Untersuchungen zur GPS/Inertial-Technologie in Luftbilddanwendungen durchgeführt worden (HEIPKE et al. 2002).

Im Rahmen dieses Artikels soll der Schwerpunkt auf die Untersuchungen mit dem integrierten GPS/Inertial-System AEROcontrol-IIId der Firma IGI mbH, Kreuztal, gelegt werden. Dieses System wurde bereits zweimal über dem Testfeld Vaihingen/Enz geflogen. Die Ergebnisse dieser Testflüge werden im Abschnitt 2 präsentiert. Für den neuesten Testflug standen dazu erstmals Daten der auf 128 Hz hoch getakteten Inertialmesseinheit (IMU) zur Verfügung. Anschließend sollen in Abschnitt 3 einige Anmerkungen zur Verwendung der direkten Georeferenzierung im operationellen Arbeitsprozess und zum Langzeitstabilitätsverhalten von GPS/Inertial-Systemen in Kombination mit einer analogen Luftbildkamera gemacht werden. Derartige Untersuchungen sind vor allem für die effiziente Nutzung der GPS/Inertial-Technologie in der Praxis relevant. Dazu stehen Daten der Firma Hansa Luftbild German Air Surveys, Münster, zur Verfügung, die im Unterschied

Tab. 1: Durchgeführte Testflüge mit verschiedenen Systeminstallationen.

| Testgebiet | Flugtermin (Monat/Jahr) | GPS/Inertial-Komponenten | Kamera |
|---------------|------------------------------|--|-------------|
| Hambach | 07/95 | UofC, Geomatics Engineering Ashtech Z 12, Litton LN-90 | RMK-A 15/23 |
| Vaihingen/Enz | 07/95, 08/96 10/96, 11/98 | DPA – spezifisch Trimble SSE 4000, Sagem DPAKSE | DPA |
| Vaihingen/Enz | 02/98 | Applanix POS/AV-510 DG Novatel Millenium, Litton LR 86 | HRSC-A |
| Bedburg | 02/98 | Applanix POS/AV-510 DG Novatel Millenium, Litton LR 86 | RMK-Top 15 |
| Vaihingen/Enz | 12/98 | Applanix POS/AV-510 DG Novatel Millenium, Litton LR 86 | RMK-Top 15 |
| Vaihingen/Enz | 06/00, 09/02 | IGI AEROcontrol-IIId Ashtech Z-Surveyor/Z-Extreme, IMU-IIId | RMK-Top 15 |

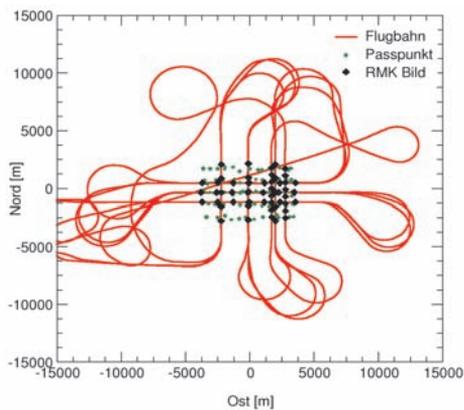


Abb. 1: AEROcontrol-Ild Test Vaihingen/Enz (Flugtag 05.06.2000).

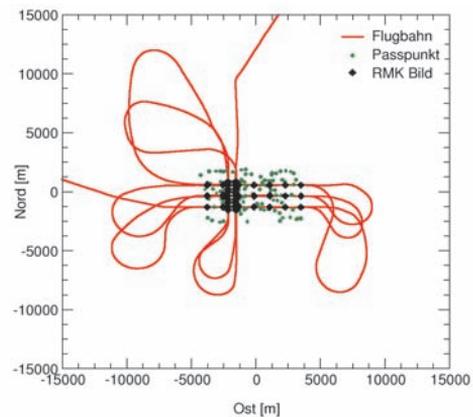


Abb. 2: AEROcontrol-Ild Test Vaihingen/Enz (Flugtag 13.09.2002).

zu den in Tab. 1 zitierten Tests im Rahmen eines kommerziellen Produktionsprojekts erfasst wurden. Die Ergebnisse zeigen damit auch die Unterschiede zwischen sorgfältig geplanten und durchgeführten Testbefliegungen und späterer kommerzieller Anwendung in der Praxis auf.

2 Testfeldbefliegungen Vaihingen/Enz

Zur Evaluierung des geometrischen Genauigkeitspotenzials wurde das AEROcontrol-Ild-System in Kombination mit einer herkömmlichen Analogluftbildkammer über dem Testfeld Vaihingen/Enz ca. 25 km nordwestlich von Stuttgart geflogen. Das Testgebiet erstreckt sich über eine Fläche von ca. 30 km² mit mehr als 80 signalisierten Punkten. Die Geländekoordinaten dieser Punkte stehen überwiegend aus statischen GPS-Basislinienmessungen zur Verfügung und können als Referenzpunkte zur absoluten Genauigkeitskontrolle verwendet werden. Mittlerweile liegen die Daten zweier Testflüge vor: Der erste Flug fand im Juni 2000 statt, die zweite Befliegung wurde im September 2002 durchgeführt. In Abb. 1 und Abb. 2 sind die Flugtrajektorien für die Testflüge gegeben. In beiden Fällen wurden parallel Luftbilder in verschiedenen Maßstäben aufgenommen (Z/I-Imaging RMK-Top 15).

Die Konzeption beider Testflüge war ähnlich und entspricht der typischen Vorgehensweise zur Evaluierung des Genauigkeitspotenzials integrierter GPS/Inertial-Systeme in der photogrammetrischen Anwendung: Die Kombination mit einer herkömmlichen Luftbildkammer erlaubt es, die direkt gemessenen Orientierungselemente aus GPS/Inertial-Daten mit den klassisch indirekt geschätzten Orientierungselementen einer Aerotriangulation (AT) zu vergleichen. Dieses Verfahren ist die einzige Möglichkeit, für hochdynamische Flugumgebungen unabhängige Vergleichswerte für die GPS/Inertial-Orientierungselemente zur Verfügung zu stellen. Allerdings hat diese Vorgehensweise zwei gravierende Nachteile:

1. Die geschätzten Orientierungen aus der AT, die später für den Vergleich und die Genauigkeitsabschätzung herangezogen werden, ergeben sich indirekt im Rahmen einer Parameterschätzung. Sie sind optimal im Sinne der Parameterschätzung, repräsentieren aber nicht notwendigerweise die physikalisch gültige äußere Orientierung des Sensors zum Zeitpunkt der Bildaufnahme, da nicht korrigierte systematische Effekte durch entsprechende Schätzung der Orientierungselemente kompensiert werden. Demgegenüber liefern GPS/Inertial-Systeme die tatsächlich gültige physikalische Orientierung des Sensors.

2. Die theoretische Genauigkeit der geschätzten Orientierungselemente aus der AT liegt in einer Größenordnung, die nicht 5–10-mal besser ist, als die erwartete Genauigkeit der Positions- und Neigungsbestimmung aus GPS/Inertial-Systemen. Die theoretische Genauigkeit der Projektionszentrumskoordinaten aus der AT ergibt sich in Abhängigkeit von Bildmaßstab und Kammerkonstante, die Genauigkeit der Neigungswinkel ist abhängig von der Qualität, Anzahl und Verteilung der Pass- und Verknüpfungspunkte. Daher können die geschätzten Orientierungen aus der AT streng genommen nicht als Referenzwerte höherer Genauigkeit zur Evaluierung der GPS/Inertial-Orientierungselemente dienen. Im weiteren Verlauf der Ausführungen wird daher bewusst der Begriff Referenzwerte aus der AT vermieden und durch den Ausdruck Vergleichswerte ersetzt.

Aus obigen Gründen erlauben die Vergleiche der Projektionszentren demnach nur eine erste Genauigkeitsabschätzung, eine endgültige Kontrolle wird erst durch die Neubestimmung von Geländepunkten und durch Vergleich mit Referenzkoordinaten möglich. Dieser Schritt kontrolliert umfassend das gesamte Aufnahmesystem bestehend aus GPS/Inertial-Komponenten und Kamera.

2.1 *Qualität der GPS/Inertial-Orientierungselemente*

Die Vergleiche der GPS/Inertial-Orientierungen mit den geschätzten Werten aus der AT ermöglichen unter Berücksichtigung der beiden zuvor erwähnten Punkte erste Abschätzungen zur Genauigkeit der direkten Orientierungsbestimmung. Für die durchgeführten Untersuchungen standen dazu für den Testflug im Jahr 2000 3×36 Bilder im Maßstab 1:13000 und 18 Bilder im Maßstab 1:6500 zur Verfügung. Für die Befliegung in 2002 wurden drei verschiedene Flughöhen mit folgenden resultierenden Bildmaßstäben realisiert: Maßstab 1:13000 (2×21 Bilder), Maßstab 1:6500 (10 Bilder) und Maßstab 1:3250 (18 Bilder). Jedes Bild definiert einen diskreten Zeitpunkt, an dem

die Vergleiche vorgenommen werden können.

Bevor die Differenzen zwischen den Orientierungselementen aus der AT und der äußeren Orientierung aus GPS/Inertial-Daten berechnet und statistisch analysiert werden können, muss zunächst die Vergleichbarkeit der Daten garantiert sein. Dazu sind die Daten in ein einheitliches Bezugssystem und auf eine gemeinsame Zeitskala zu transformieren. Anschließend sind für die Positionen die räumlichen Exzentrizitäten zwischen GPS-Phasenzentrum, Schwerpunkt IMU und dem physikalischen objektseitigen Projektionszentrum der Kamera zu berücksichtigen und zu korrigieren. Der Abstand des objektseitigen Projektionszentrums von der Fokalebene der Kamera ist dabei abhängig vom verwendeten Objekttyp. Er hat nur bedingt mit der kalibrierten Kammerkonstante zu tun und wird vom Kamerahersteller als eigene Größe zur Verfügung gestellt. So beträgt z. B. für eine Z/I-Imaging RMK-Top15 (mit Pleogon-Objektiv) dieser Abstand 25.4 cm. Für die Normalwinkelkamera RMK-Top30 (mit Topar-Objektiv) ist der Abstand 26.2 cm groß und damit nur unwesentlich größer als bei der Weitwinkelkamera (IGI 2003). Im Regelfall werden die Vektoren zwischen GPS, IMU und Fokalebene a priori gemessen und bereits im Rahmen der GPS/Inertial-Datenverarbeitung als Hebelarme berücksichtigt. Eine entsprechende Hebelarmkorrektur setzt zusätzlich die Berücksichtigung der durch die stabilisierende Plattform hervorgerufenen Änderungen voraus. Dazu können von den heute üblichen Stabilisierungen die entsprechenden Stellwinkel zum Zeitpunkt der Kameraauslösung ausgelesen werden.

Aufwändiger gestalten sich die Vergleiche der Neigungswinkel, da sich GPS/Inertial-Winkel auf das IMU-Koordinatensystem, die Vergleichswerte aus der AT aber auf die Achsausrichtung des Bildkoordinatensystems beziehen. Beide Systeme weisen eine Fehlansrichtung aufgrund der Einbauwinkel auf, das sogenannte Boresightwinkel-Alignment. Diese Fehlansrichtung bleibt konstant, sofern sich keine relativen Änderungen zwischen IMU und Kamera ergeben.

Die Boresightwinkel sind nicht a priori zu messen, sondern können nur im Rahmen einer Kalibrierung bestimmt werden. Dazu werden die Winkeldifferenzen an einer gewissen Anzahl von Bildern explizit bestimmt und anschließend alle GPS/Inertial-Winkel um diese Boresightwinkel-Korrektur bereinigt. Typischerweise geschieht diese Kalibrierung in einem speziell hergerichteten Kalibrierfeld. Alternativ kann in einer sog. integrierten Sensororientierung – GPS/Inertial-Daten werden als zusätzliche Beobachtungen in einer Parameterschätzung verwendet und darin die Boresightwinkel als eine Gruppe von Unbekannten geschätzt – diese Boresightwinkel-Korrektur auch im eigentlichen Befliegungsgebiet ohne Verwendung von Passpunkten vorgenommen werden, womit der Zusatzaufwand für ein separates Kalibrierfeld im Prinzip gespart werden kann. Diese integrierte Sensororientierung erlaubt es darüber hinaus, die Gesamtsystem-Kalibrierung für jedes Befliegungsgebiet optimal zu bestimmen und ist somit ein geeignetes Verfahren für höchste Genauigkeit und Zuverlässigkeit. Dazu werden im Abschnitt 3 noch einige weitere Ausführungen gegeben.

Für die hier vorgestellten Testfeldbefliegungen Vaihingen/Enz wurde ein Teil der zur Verfügung stehenden Bilder zur Korrektur der Boresightwinkel ausgewählt. Im Testflug 2000 waren dies die Bilder von insgesamt 9 Flugstreifen des Bildmaßstabs 1:13 000, für den Flug 2002 wurden alle 42 Bilder im Maßstab 1:13 000 für die Korrektur verwendet. Der Umstand, dass ein Teil der eigentlich zur unabhängigen Genauigkeitsevaluierung vorgesehen Bilder des Testgebietes zur Systemkalibrierung verwendet wird, ist ein Manko fast aller bisher durchgeführten GPS/Inertial-Genauigkeitsuntersuchungen, welches sich daraus ergibt, dass im Normalfall keine zwei räumlich voneinander getrennten Testgebiete mit ausreichender Passpunktanzahl zur unabhängigen Kontrolle zur Verfügung stehen. Daher geben derartige Untersuchungen auch aus diesem Grunde eher eine Abschätzung für die maximal erreichbare Genauigkeit der GPS/Inertial-Orientierungsbestimmung an, die sich nur unter optimalen Bedingungen in der späteren Praxis reproduzieren lässt.

Die für das AEROcontrol-II-d ermittelten Genauigkeiten der Positions- und Neigungsbestimmung sind für beide Testflüge

Tab. 2: Genauigkeit (RMS) GPS/Inertial-Projektionszentren (n/a – Angaben für Flug 2002 liegen noch nicht vor).

| Maßstab | RMS-Werte [m], Test 2000 | | | | RMS-Werte [m], Test 2002 | | | |
|---------|--------------------------|------------|------------|------------|--------------------------|------------|------------|------------|
| | # | ΔX | ΔY | ΔZ | # | ΔX | ΔY | ΔZ |
| 13000 | 108 | 0,11 | 0,09 | 0,06 | 42 | 0,08 | 0,08 | 0,04 |
| 6500 | 18 | 0,03 | 0,07 | 0,08 | 10 | n/a | n/a | n/a |
| 3250 | — | — | — | — | 18 | n/a | n/a | n/a |

Tab. 3: Genauigkeit (RMS) GPS/Inertial-Neigungswinkel (n/a – Angaben für Flug 2002 liegen noch nicht vor).

| Maßstab | RMS-Werte [deg], Test 2000 | | | | RMS-Werte [deg], Test 2002 | | | |
|---------|----------------------------|----------------|-----------------|----------------|----------------------------|----------------|-----------------|----------------|
| | # | $\Delta\omega$ | $\Delta\varphi$ | $\Delta\kappa$ | # | $\Delta\omega$ | $\Delta\varphi$ | $\Delta\kappa$ |
| 13000 | 94 | 0,0025 | 0,0023 | 0,0052 | 42 | 0,0034 | 0,0033 | 0,0053 |
| 6500 | 18 | 0,0030 | 0,0022 | 0,0057 | 10 | n/a | n/a | n/a |
| 3250 | — | — | — | — | 18 | n/a | n/a | n/a |

getrennt nach den verschiedenen Maßstäben in den Tab. 2 und 3 aufgeführt. Diese Zahlen sind unter Berücksichtigung der zu Anfang von Abschnitt 2 gemachten Anmerkungen zu interpretieren. Leider können für den Testflug 2002 bisher nur die Bilder 1:13000 analysiert werden, da momentan ausschließlich für die Bilder dieses Bildverbands die endgültigen GPS/Inertial-Orientierungselemente für die Genauigkeitsuntersuchungen zur Verfügung gestellt wurden. Die Verarbeitung der AEROcontrol GPS/Inertial-Daten wurde für beide Vaihingen/Enz-Testflüge vom Systemhersteller IGI vorgenommen und die endgültigen Orientierungselemente für die beiden großmaßstäbigen Bildverbände 1:6500 und 1:3250 der Testkampagne 2002 sind dem ifp bisher von IGI noch nicht geliefert worden. Der Eintrag „n/a“ (not available) in den Tabellen ist dementsprechend zu interpretieren.

Für die Koordinaten der Projektionszentren können für alle Maßstäbe Genauigkeiten (RMS) im Bereich von 1 dm erreicht werden. Dabei fällt auf, dass die Höhenkomponente fast durchgängig Faktor 2 besser bestimmt werden kann, was aus der Theorie der GPS/Inertial-Positionsbestimmung nicht zu erwarten ist. Diese Zahlenwerte spiegeln daher nicht die eigentliche Genauigkeit der GPS/Inertial-Positionierung, sondern geben vielmehr das theoretische Genauigkeitsverhalten der geschätzten Vergleichswerte aus der AT wieder und belegen damit, dass die AT eigentlich nicht als Referenz herangezogen werden kann.

Die Winkelgenauigkeit (Variation (RMS) der Winkeldifferenz nach Korrektur um mittlere Boresightwinkel) liegt typischerweise im Bereich von 0.002 deg (8'') und 0.006 deg (21'') und damit in dem Genauigkeitsbereich von 10''–25'', der auch in anderen Testflügen für derartige Systeme nachgewiesen wurde. Um diese Genauigkeiten zu erreichen, wurden die beiden ersten Flugstreifen der 2000er Befliegung ausgeklammert, da in diesem Flug das spezielle „initial alignment“-Flugmanöver vor Erreichen des Testgebietes vergessen wurde und daher aufgrund der unzureichenden Winkelinitialisierung noch deutliche systematische Effekte

im κ -Winkel zu erkennen waren. Erst durch die Dynamik der Kurvenflüge nach den ersten zwei Flugstreifen ist die Verbesserung der Initialisierung möglich. Alle weiteren Details zur Auswertung des Testflugs 2000 können in CRAMER (2001) nachgelesen werden.

Die bisher vorliegenden Ergebnisse der Befliegung 2002 zeigen im Vergleich zur 2000er Befliegung vergleichbare Genauigkeiten. Es ist allerdings ausdrücklich anzumerken, dass im Flug 2002 alle 42 Bilder des Maßstabs 1:13000 für die Systemkalibrierung zur Verfügung gestellt wurden und daher keine unabhängige Kontrolle mehr möglich ist. Die in Tab. 3 ermittelten Genauigkeiten für die Winkelbestimmung mit dem AEROcontrol-II d unter Verwendung der auf 128 Hz getakteten IMU müssen erst durch die Auswertungen der zwei weiteren Bildmaßstäbe und zusätzliche Flugtests verifiziert werden.

2.2 Qualität der direkten Georeferenzierung

Wie bereits zuvor erwähnt, erlauben die Vergleiche an den Projektionszentren nur eine erste Abschätzung des zu erwartenden Genauigkeitspotenzials der direkten Georeferenzierung. Die umfassende Evaluierung des Gesamtsystems bestehend aus AEROcontrol-II d und RMK-Top 15 ist erst durch Absolutvergleiche an unabhängig bestimmten Kontrollpunkten im Objektraum möglich. Dazu werden unter Verwendung der GPS/Inertial-Orientierungselemente und der Bildmessungen die Koordinaten einer ausreichenden Anzahl von Kontrollpunkten durch Vorwärtsschnitt (direkte Georeferenzierung) neu bestimmt und anschließend die Differenzen zu den gegebenen Referenzkoordinaten statistisch analysiert. Je nach gewählter Blockkonfiguration ergeben sich dann die Genauigkeiten der Objektpunktbestimmung. Bei sehr hoher Bildüberdeckung und somit starker Blockverknüpfung stehen Bildstrahlen aus mehreren Bildern für die Koordinierung der Objektpunktkoordinaten zur Verfügung, wodurch Restfehler in den GPS/Inertial-Orientierungselementen

herausgemittelt werden können. Daher liefert die direkte Georeferenzierung bei Bildverbänden mit hoher Bildüberlappung und Verknüpfung in der Regel höhere Genauigkeiten als wenn man nur die Beobachtungen eines einzelnen Flugstreifens mit maximal 3-fach verknüpften Punkten für die Punktbestimmung heranzieht. Die für die AERO-control-Testflüge aus den Absolutvergleichen im Objektraum abgeleiteten RMS-Werte in Tab. 4 reflektieren unmittelbar das Genauigkeitspotenzial der direkten Georeferenzierung, da mögliche negative Einflüsse von Punktidentifizierungsfehlern durch die Signalisierung aller Punkte minimiert wurden. Weil für den Flug 2002 erst für einen Bildmaßstab endgültige Orientierungselemente zur Verfügung stehen, basieren die in der Tabelle gezeigten Genauigkeitsuntersuchungen verschiedener Blockkonfigurationen ausschließlich auf der Verwendung der 13000er Bilder.

Die bisher vorliegenden Ergebnisse der Befliegungen sind insgesamt sehr zufriedenstellend. Im Idealfall, d. h. bei sehr guter Blockgeometrie (Kreuzbefliegung mit starker Verknüpfung) und optimaler Gesamtsystemkalibrierung, können Genauigkeiten erzielt werden, die fast im Bereich der herkömmlichen AT liegen. Für eher typischere Blockkonfigurationen, parallele Streifen mit photogrammetrischen Standardüberdeckungen (in Tab. 4 Beispiele parallele Linien, 2 Streifen), sind für gleiche Maßstäbe

bereits etwas geringere Genauigkeiten zu erwarten. Im Hinblick auf die spätere Reproduzierbarkeit der Resultate ist es daher realistischer, von Objektpunktgenauigkeiten auszugehen, die verglichen mit der klassischen AT um den Faktor 1,5–2 schlechter sind. Für große und mittlere Maßstäbe sollten somit in Abhängigkeit von der Blockkonfiguration Genauigkeiten im Bereich von 10–20 cm für die Horizontal- bzw. 15–25 cm für die Vertikalkomponente möglich sein. Dieses Genauigkeitspotenzial wurde auch für andere Systeme mittlerweile mehrfach unabhängig voneinander bestätigt.

Die interessante Frage ist nun, inwieweit sich diese Genauigkeiten, die in den genau definierten und extra dafür konzipierten Testflügen wie z. B. über Vaihingen/Enz ermittelt wurden, auch auf praktische Anwendungen übertragen lassen. Dieser Punkt wird nachfolgend betrachtet.

3 Direkte Georeferenzierung im operationellen Umfeld

Die im Folgenden präsentierten Daten entstammen einem großen kommerziellen Befliegungsprojekt, das die Firma Hansa Luftbild über einen etwa 2-monatigen Zeitraum Anfang 2001 in Saudi-Arabien durchgeführt hat. Ziel dieses Projekts war im Wesentlichen die Produktion von digitalen Stadtgrundkarten. Dazu wurden während dieser Kampagne insgesamt mehr als 9000

Tab. 4: Qualität der direkten Georeferenzierung.

| Test | Anzahl Bilder | Maßstab | Blockkonfiguration | Genauigkeit RMS [cm] | | |
|------|---------------|---------|----------------------------------|----------------------|------------|------------|
| | | | | ΔX | ΔY | ΔZ |
| 2000 | 36 | 13000 | Kreuzbefliegung, 6 Streifen | 5,5 | 6,8 | 8,9 |
| | 36 | 13000 | Kreuzbefliegung, 6 Streifen | 7,1 | 9,6 | 15,2 |
| | 14 | 13000 | Parallele Linien, 2 Streifen | 11,3 | 12,6 | 13,8 |
| | 16 | 6500 | Parallele Linien, 2 Streifen | 4,9 | 6,4 | 8,7 |
| 2002 | 42 | 13000 | Parallele Linien, 2 × 3 Streifen | 8,5 | 10,9 | 12,4 |
| | 21 | 13000 | Parallele Linien, 3 Streifen | 10,5 | 11,2 | 18,2 |
| | 14 | 13000 | Parallele Linien, 2 Streifen | 11,7 | 10,4 | 14,5 |

Bilder an 12 verschiedenen Flugtagen aufgezeichnet. Während der ersten 10 Flugtage wurden die Bilder im Maßstab 1:5500 mit einer Normalwinkelkamera RMK-Top30 aufgenommen und parallel dazu vom AEROcontrol-IIId quasi-kontinuierlich (64 Hz) GPS/Inertial-Daten aufgezeichnet. Da während dieses Zeitraums nichts an der Gesamtsystemkonfiguration geändert wurde, können Aussagen über die Stabilität der Systemkalibrierung und die Langzeitgenauigkeit der direkten Georeferenzierung getroffen werden. Neben den eigentlichen Befliegungsgebieten wurde zusätzlich an jedem Flugtag ein speziell signalisiertes Kalibrierfeld in der Nähe des Flughafens überflogen. Bei diesem Kalibrierfeld handelt es sich um einen einzelnen Flugstreifen, bestehend aus sechs voll signalisierten Stereomodellen. Die dazu notwendigen 21 Passpunkte wurden mittels statischer GPS-Basislinienmessungen koordiniert. Dieser Kalibrierstreifen wurde im Regelfall an jedem Flugtag jeweils einmal vor bzw. nach der eigentlichen Befliegung in entgegengesetzter Richtung überflogen, sodass typischerweise pro Flugtag 2×7 Bilder zur Kalibrierung zur Verfügung standen.

Die Daten der Kalibrierstreifen erlauben es nun, ähnlich wie auch bei den Testbefliegungen Vaihingen/Enz, die Qualität der GPS/Inertial-Orientierungselemente durch Vergleich mit den rechnerischen Orientierungen aus einer AT abzuschätzen. Zusätzlich können aus den jeweiligen Streifen für jeden Tag die entsprechenden Systemkalibrierparameter abgeleitet und anschließend untereinander verglichen werden. Da an der Gesamtkonfiguration keine Änderungen vorgenommen wurden, reflektieren die Variationen der Kalibrierparameter die Stabilität der Systemkalibrierung über einen längeren Zeitraum (CRAMER & STALLMANN 2002).

3.1 Qualität operationeller GPS/Inertial-Positions- und -Winkelbestimmung

Mit dem Kalibrierstreifen steht ein Testfeld mit ausreichender Anzahl von Passpunkten zur Verfügung. Allerdings besteht dieses

Testfeld im Gegensatz zu dem oben genannten Testfeld Vaihingen/Enz nur aus einem einzelnen Streifen. Hinzu kommt die Befliegung mit einer Normalwinkelkamera, die bei gleichem Bildmaßstab eine schlechtere theoretische Genauigkeit für die Bestimmung der Projektionszentren im Vergleich zu einer Befliegung mit einer Weitwinkelkamera zulässt. Diese Punkte müssen bei den nachfolgend abgeleiteten Genauigkeiten für die GPS/Inertial-Orientierungselemente im operationellen Umfeld berücksichtigt werden.

Die Abb. 3 zeigt exemplarisch die für den Kalibrierstreifen ermittelten Winkeldifferenzen zwischen GPS/Inertial- und AT-Winkeln für den Flugtag am 05.02.2001. Dargestellt sind die individuellen Winkeldifferenzen für die 2×7 Bilder der beiden geflogenen Kalibrierstreifen dieses Tages (Vormittag/Nachmittag).

Die aus den Differenzen abgeleiteten Mittelwerte der Winkeldifferenzen liegen für $\Delta\omega$ und $\Delta\varphi$ bei 0,002 deg (11'') und 0,006 deg (21'') und sind in $\Delta\varphi$ und vor allem in $\Delta\kappa$ im Vergleich zu den ebenfalls mit 64 Hz aufgezeichneten Daten der Testbefliegung Vaihingen/Enz 2000 deutlich schlechter. Die Variationen für $\Delta\kappa$ betragen 0,01 deg (36''). Auffällig sind hier deutliche streifenabhängige Systematiken, die darauf hindeuten, dass in der Integration der GPS/Inertial-Daten die systeminternen Fehler der IMU nicht

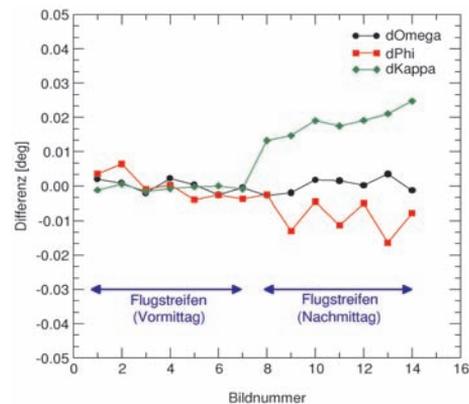


Abb. 3: Winkelvariationen Kalibrierstreifen (Flugtag 05.02.2001).

gänzlich eliminiert werden konnten. Diese systematischen Fehler sind für andere Flugtage dieser Kampagne noch deutlicher ausgeprägt. Bei ausreichender Satellitengeometrie und unter Beachtung der sonstigen Randbedingungen sollten derartige Effekte nicht auftreten. Sie lassen sich nur damit begründen, dass aufgrund zeitlicher Einschränkungen die Prozessierung der GPS/Inertial-Daten nicht mit der ausreichenden Sorgfalt durchgeführt wurde. Durch eine Wiederholung der GPS/Inertial-Datenverarbeitung könnte die Qualität deutlich verbessert werden. Diese Neuberechnungen sind aber mit zeitlichem und damit auch finanziellem Mehraufwand verbunden und werden daher in kommerziellen Anwendungen selten vorgenommen. Werden somit die Restfehler in den GPS/Inertial-Orientierungselementen nicht erkannt und korrigiert, wirken sie sich auch im weiteren Auswerteprozess im Rahmen der Systemkalibrierung (Bestimmung der Boresightalignment-Winkel) und der späteren direkten Georeferenzierung negativ aus.

Für das gezeigte Beispiel vom 05. 02. 2001 ergeben sich nach direkter Georeferenzierung Objektraumgenauigkeiten (RMS) von 19 cm bzw. 11 cm für Ost- und Nordkoordinate. Die Genauigkeit der Höhenkomponente liegt bei 38 cm (RMS). Der Wert für

$\hat{\sigma}_0$ beträgt 29 μm . Die Differenzvektoren sind in Abb. 4 für alle 21 Kontrollpunkte getrennt nach Lage- und Höhenkomponente dargestellt.

Deutlich sind größere Abweichungen zu erkennen, die in der Höhe Extremwerte von ± 60 cm erreichen. Die Lagevektoren weisen einen Trend in Südost-Richtung auf, die Vertikalkomponente zeigt ebenfalls systematische Verfälschungen. Derartige Fehler können im Regelfall nicht mehr akzeptiert werden, wobei der kritische Punkt vor allem darin liegt, dass diese Objektraumfehler ohne Kontrollpunkte im eigentlichen Befelegungsgebiet zunächst gar nicht nachgewiesen werden können – eine Situation, die aus Gründen der Zuverlässigkeit strikt zu vermeiden ist.

Daher sollte mindestens ein Punkt im Befelegungsgebiet für Kontrollzwecke zur Verfügung stehen, der ggf. auch als Passpunkt verwendet werden kann, um die Qualität der Punktbestimmung nachträglich durch eine integrierte Sensororientierung zu verbessern. Das Verfahren der integrierten Sensororientierung basiert auf den gleichen Eingangsdaten wie die direkte Georeferenzierung, allerdings werden die GPS/Inertial-Orientierungselemente als Beobachtungen mit entsprechender Genauigkeit in einer Parameterschätzung berücksichtigt. Gleichzeitig können weitere Korrekturterme einge-

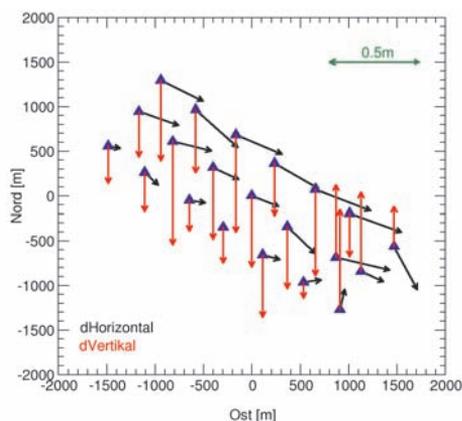


Abb. 4: Qualität direkte Georeferenzierung (Flugtag 05. 02. 2001).

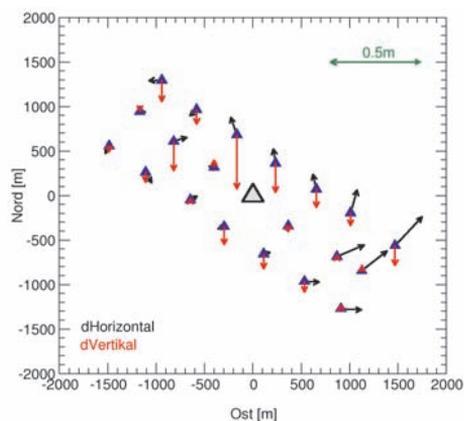


Abb. 5: Qualität integrierte Sensororientierung (Flugtag 05. 02. 2001).

führt werden um Restfehler in den Orientierungselementen zu kompensieren. Diese Vorgehensweise ist analog zu der Behandlung von Offset- und Driftparametern der GPS-gestützten AT. Die Verwendung von Passpunkten geringer Anzahl erlaubt die Korrektur globaler Offsetparameter, Verbesserungen z.B. der Boresightalignment-Winkel sind aber auch ohne Verwendung von Passpunkten möglich.

Wird für das in Abb. 4 gezeigte Beispiel ein Punkt in der Mitte des Testgebiets als Passpunkt eingeführt und anschließend eine integrierte Sensororientierung mit zusätzlicher Korrektur signifikanter Offsets in Position und Winkeln berechnet, so ergeben sich an den verbleibenden 20 Kontrollpunkten die in Abb. 5 dargestellten Differenzen.

Das σ_0 kann auf 4 μm verbessert werden. Die statistische Analyse der Differenzvektoren führt zu folgenden RMS-Werten: 8 cm (Ost), 7 cm (Nord), 11 cm (Vertikal). In allen drei Koordinatenachsen ergeben sich deutliche Genauigkeitssteigerungen. Vor allem in der Höhenkomponente ist eine signifikante Verbesserung um Faktor 3 möglich. Der Vergleich der Abb. 5 mit Abb. 4 verdeutlicht den Genauigkeitszuwachs. Die integrierte Sensororientierung erlaubt es durch die entsprechende Modellierung der Restfehler mit minimaler Anzahl von Passpunkten Objektivraumgenauigkeiten zu realisieren, die vergleichbar sind mit den Resultaten einer Standard-AT mit ausreichender Passpunktanzahl. Diese Genauigkeiten konnten erreicht werden, obwohl bei der GPS/Inertial-Datenintegration nicht das volle Genauigkeitspotenzial ausgeschöpft wurde. Es muss aber zusätzlich angemerkt werden, dass es im Gegensatz zur klassischen AT, mit ausreichender Passpunktbesetzung in Blockecken- bzw. am Blockrand (Neupunkte werden daher im gegebenen Passpunktrahmen interpoliert), bei der integrierten Sensororientierung mit sehr wenigen Passpunkten (im Extremfall wie hier nur ein Passpunkt) aufgrund von Extrapolation zu größeren Abweichungen in passpunktfernen Bereichen des Gebiets kommen kann. Auch diese Effekte sind in Abb. 5 zu erkennen.

3.2 Stabilität Langzeitkalibrierung

Neben dem Nachweis der Genauigkeit der GPS/Inertial-Positions- und Winkelbestimmung unter operationellen Bedingungen erlauben diese Daten erste Abschätzungen zur Stabilität einer Gesamtsysteminstallation, bestehend aus Kamera und GPS/Inertial-Komponenten über längere Zeiträume (etwa 6 Wochen). Dazu wurden basierend auf den Kalibrierflügen für jeden Tag die Kalibrierparameter neu bestimmt und anschließend deren zeitliche Variationen untersucht. Die Gesamtsystemkalibrierung wird ebenfalls durch integrierte Sensororientierung bestimmt: Unter Einbeziehung der zur Verfügung stehenden Passpunkte werden die gewünschten Kalibrierparameter als unbekannte Größen in einer Parameterschätzung geliefert. In diesem Fall wurden drei verschiedene Typen von Kalibrierparametern bestimmt: Positionsoffsets, Boresightalignment-Winkel und der Einfluss von Zusatzparametern zur Kamerasselbstkalibrierung. Die wesentlichen Ergebnisse dieser Untersuchungen sind nachfolgend zusammengefasst:

Für fast alle Kalibrierflüge sind signifikante Offsets in der Vertikalkoordinate nachweisbar. Diese Offsets sind nicht konstant, sondern können innerhalb von zwei aufeinanderfolgenden Flugtagen in einem Bereich von 10–40 cm variieren. Deutlich kleinere horizontale Offsets bis max. 20 cm sind demgegenüber nur für wenige Flugtage signifikant bestimmbar. Obwohl Positionsoffsets dieser Größenordnung für eine qualitativ hochwertige differenzielle GPS-Phasenlösung bei sorgfältiger Datenprozessierung nicht zu erwarten sind, sind sie aus vielen Praxisanwendungen der GPS-gestützten AT bereits bekannt und werden dort über die zusätzlichen Offset- und Driftparameter kompensiert. Die Offsets müssen aber nicht zwingend aufgrund globaler Verschiebungen oder Fehler der GPS-Trajektorie hervorgerufen sein, sondern können auch durch Inkonsistenzen zwischen physikalischer Realität und mathematischem Modell verursacht werden. Für den Zusammenhang zwischen angenommener Kammer-

konstante und resultierender Vertikalkomponente ist diese Problematik offensichtlich. Insgesamt erscheint es hinsichtlich einer Langzeitkalibrierung sinnvoll, eine mittlere Korrektur der Vertikalkomponente vorzunehmen. Allerdings müssen bei Verwendung dieser Langzeitkalibrierung alle Abweichungen von dieser mittleren Korrektur bei einer späteren direkten Georeferenzierung in Kauf genommen werden.

Die Bestimmung der Boresightalignment-Winkel ist wesentlich von einer qualitativ hochwertigen GPS/Inertial-Datenverarbeitung abhängig. Es ist sehr einfach nachvollziehbar, dass sich Restsystematiken in den GPS/Inertial-Winkeln, wie sie z. B. in Abb. 3 gezeigt wurden, voll auf die Schätzung der Boresightwinkel niederschlagen. Um daher eine realistische Abschätzung der Stabilität des Boresightalignments zu treffen, werden diejenigen Flugtage, an denen deutliche systematische Fehler in der GPS/Inertial-Winkelbestimmung erkennbar sind (u. a. Flugtag 05. 02. 2001), von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen. Nach Ausschluss dieser Daten lassen sich für die drei Boresightwinkel Variationen von $\sigma_{\delta\omega} = 0,0032 \text{ deg } (11'')$, $\sigma_{\delta\phi} = 0,0050 \text{ deg } (18'')$, bzw. $\sigma_{\delta\kappa} = 0,0026 \text{ deg } (9'')$ nachweisen. Diese Werte liegen mit Ausnahme von $\delta\phi$ im Bereich des zu erwartenden Genauigkeitspotenzials der GPS/Inertial-Winkelbestimmung und können daher als Maß für die physikalische Stabilität des Boresightwinkel-Alignments über einen längeren Zeitraum interpretiert werden.

Bei der Kalibrierung eines Gesamtsystems muss neben den GPS/Inertial-Sensoren auch wie bisher die Kamera als wesentliche Komponente berücksichtigt werden. Daher wurden für alle Kalibrierstreifen Zusatzparameter zur Kompensation von Bildfehlern mitbestimmt. Für die hier untersuchte Kamera liegen die Korrekturen im Bereich von $10 \mu\text{m}$ im Bild. Die Verzeichnungen zeigen für alle Flugtage gewisse Ähnlichkeiten, können aber im Detail variieren, sodass nicht davon ausgegangen werden darf, dass derartige Effekte bereits im Vorhinein vollständig zu korrigieren sind. Diese Tatsache ist bereits aus der Zeit erster

Untersuchungen zur Verwendung der Selbstkalibrierung in Bündelprogrammen bekannt.

Aus diesen Erfahrungen können nun Folgerungen für die Verwendung von Kalibrierparametern über längere Zeiträume abgeleitet werden. Es ist demnach davon auszugehen, dass bei geeigneter Befestigung der IMU die Boresightwinkel auch über längere Zeiträume stabil bleiben. Wichtig ist aber deren korrekte Bestimmung, die eine optimale Verarbeitung der GPS/Inertial-Daten voraussetzt. Die Variationen der Zusatzparameter können nicht vollständig a priori erfasst und korrigiert werden. Daraus resultierende Restfehler müssen mit etwa $10 \mu\text{m}$ im Bild abgeschätzt werden. Der größte Fehlerinfluss für die hier untersuchten Flüge wird durch die Variationen in den Positionsoffsets hervorgerufen, vor allem in der Vertikalkomponente. Diese Offsets lassen sich nicht reproduzieren und ihr Fehlerbudget bei der Objektpunktbestimmung ist für den hier geflogenen Bildmaßstab deutlich größer als der Einfluss der Variationen in Boresightwinkeln und Zusatzparametern. Wird daher für alle Testflüge nur ein Parametersatz von mittleren Kalibriertermen angesetzt, ergeben sich bei der nachfolgenden direkten Georeferenzierung in der Vertikalkomponente die größten Abweichungen. Solche Fehler können nur durch eine flugtag-spezifische Verbesserung der Systemkalibrierung oder durch integrierte Sensororientierung im eigentlichen Befliegungsgebiet kompensiert werden (siehe Abb. 5). Alle weiteren Details zu den hier nur auszugsweise präsentierten Untersuchungen können CRAMER (2002) entnommen werden.

4 Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurden Ergebnisse der direkten Georeferenzierung unter Verwendung des AEROcontrol-IId-Systems in Kombination mit klassischen Luftbildkameras in verschiedenen Testumgebungen präsentiert. Unter den kontrollierten Bedingungen spezieller Testfeldbefliegungen können Objektpunktgenauigkeiten erreicht werden, die sich von den Ergebnissen der

klassischen AT nur um den Faktor 1,5–2 unterscheiden. Diese Genauigkeiten sind sehr zufriedenstellend und auch für andere Flüge und vergleichbare Systeme nachgewiesen. Voraussetzungen zum Erreichen dieser Genauigkeiten sind eine optimale GPS/Inertial-Datenintegration und die korrekte Kalibrierung des Gesamtsystems. Unter operationellen Flug- und Auswertebedingungen können diese Kriterien aber nicht garantiert werden, vor allem dann nicht, wenn an die Verwendung von Kalibrierparametern über längere Zeiträume gedacht wird. In diesem Fall erlaubt das Verfahren der integrierten Sensororientierung die nachträgliche Verbesserung der Systemkalibrierung und die umfassende Kontrolle der Auswertung. Die Verwendung aller Beobachtungen in einer gemeinsamen Parameterschätzung liefert höchste Genauigkeit und Zuverlässigkeit.

Die GPS/Inertial-Orientierungselemente können darüber hinaus im Rahmen der automatischen AT für die Initialisierung von Startwerten und die Überbrückung texturschwacher Bereiche verwendet werden. Erste Erfahrungen aus der Praxis belegen den positiven Einfluss, allerdings muss die effiziente Integration der Zusatzdaten aus GPS/Inertial-Systemen in die automatische AT noch weiter untersucht werden.

Literatur

- CRAMER, M., 2001: Performance of IGI AERO-control-IIId GPS/inertial system. – Final report, Institute for Photogrammetry (ifp), University of Stuttgart, Germany, digital verfügbar unter www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/2001/cramer_igi01.pdf, 16 Seiten.
- CRAMER, M., 2002: Investigations on long term stability of system calibration for direct georeferencing. – Final report, Institute for Photogrammetry (ifp), University of Stuttgart, Germany, digital verfügbar unter www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/2002/igi_final_report.pdf, 38 Seiten.
- CRAMER, M. & STALLMANN, D., 2002: System calibration for direct georeferencing – International Archives on Photogrammetry and Remote Sensing IAPRS, Volume XXXIV, Com. III, Part A: 79–84, ISPRS Commission III Symposium, Graz, September 2002.
- HEIPKE, C., JACOBSEN, K. & WEGMANN, H. (Eds.), 2002: Integrated sensor orientation – Test report and workshop proceedings. – OEEPE official publications No.43, digital verfügbar unter www.oeepe.org/publications/pdf/no_43.pdf, 302 Seiten.
- HOFMANN, O., KALTENECKER, A. & MÜLLER, F., 1993: Das flugzeuggestützte, digitale Dreizeilenaufnahme- und Auswertesystem DPA – erste Erprobungsergebnisse – In: FRITSCH & HOBBIE (Eds.): Photogrammetric Week '93, Wichmann Verlag, Heidelberg, Seiten 193–204.
- IGI 2003, AEROoffice User Manual Vers. 4.07, Kreuztal, Germany, 2003.
- ŠKALOUD, J., CRAMER, M. & SCHWARZ, K. P., 1996: Exterior orientation by direct measurement of camera position and attitude – International Archives on Photogrammetry and Remote Sensing IAPRS, Volume XXXI, Part B3: 125–130, ISPRS Kongress, Wien, Juli 1996.
- WEWEL, F., SCHOLTEN, F., NEUKUM, G. & ALBERTZ, J. (1998): Digitale Luftbildaufnahme mit der HRSC – Ein Schritt in die Zukunft der Photogrammetrie. – Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation (PFG), **1998** (6): 337–348.

Anschrift des Verfassers:

Dr.-Ing. MICHAEL CRAMER
 Institut für Photogrammetrie (ifp)
 Universität Stuttgart, Geschwister-Scholl-Str.
 24D, D-70174 Stuttgart
 Tel.: 0711–121 4118, Fax: 0711–121 3297
 e-mail: michael.cramer@ifp.uni-stuttgart.de

Manuskript eingereicht: April 2003
 Angenommen: Mai 2003

Moderne Verfahren der Geo-Referenzierung in der praktischen Anwendung

FRANK DREESEN & RALF SCHROTH, Münster

Keywords: photogrammetry, airborne sensor orientation, GPS, IMU, empirical results

Zusammenfassung: Die Firma HANSA LUFT-BILD arbeitet seit vielen Jahren mit dem Entwicklungsteam der IGI mbH sehr eng zusammen. Deshalb soll in diesem Beitrag auf die jüngsten Entwicklungen im Bereich der inertialen Messeinheiten (IMU) eingegangen werden. Gleichzeitig soll aber auch die Parallelität zu den indirekten Verfahren der Sensororientierung aufgezeigt werden. Der Schwerpunkt liegt dabei auf den in der Anwendung am häufigsten eingesetzten Sensortypen.

Summary: *Modern Methods of Geo-Referencing in Practical Applications.* The company HANSA LUFTBILD closely cooperates since many years with the development team of IGI mbH. Therefore this article will show the newest developments in the field of inertial measurement units (IMU). Additionally the principles of the method of indirect sensor orientation will be described. The main focus is on the application of the most common sensors.

1 Einleitung

In der Erderkundung nehmen Flugzeug-gestützte Sensoren einen immer wichtigeren Platz ein. Dies steht auch im Zusammenhang mit der Etablierung der Geo-Informationssysteme in der Mehrzahl der raumbezogenen Anwendungen. Hier ist eine schnelle, kostengünstige und aktuelle Informationsgewinnung eine wichtige Voraussetzung für den Nutzer. Zu den heute gebräuchlichen Sensoren zählen in erster Linie die bekannten optischen, passiven Aufnahmesysteme, wie Luftbildkameras und vereinzelt bereits digitale optische Sensoren in den verschiedensten Spektralbereichen. Daneben spielen aktive Sensoren wie das Airborne Laser Scanning oder das InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) eine zunehmend wichtige Rolle. Allen diesen Sensoren ist gemeinsam, dass ihre Orientierung im Raum zum Zeitpunkt der Informationsaufzeichnung bekannt bzw. bestimmbar sein muss. Dies erfolgte in der Vergangenheit überwiegend durch indirekte Verfahren, wie zum Beispiel mittels der Aero-

triangulation in der Photogrammetrie (indirekte Geo-Referenzierung). Bereits in den 70er Jahren begann man aber durch Aufzeichnung weiterer Sensoren wie Statoskop (ACKERMANN 1974), später aber vor allem durch die Anwendung des Differential-GPS, Orientierungselemente der Sensoren direkt zu bestimmen, um eine Unterstützung der indirekten Orientierung zu erreichen und vor allem um die notwendige Anzahl der Referenzpunkte zum Zielkoordinatensystem (Passpunkte) zu reduzieren (FRIESS 1990). In jüngster Zeit schaffen sich aber bereits direkte Aufzeichnungen sämtlicher Orientierungselemente (sog. direkte Geo-Referenzierung) mittels einer Kombination aus GPS und inertialer Messeinheit (IMU) einen festen Platz in der Anwendung.

Im Folgenden sollen nun die in der Anwendung gebräuchlichsten Sensoren vorgestellt werden. Die verschiedenen Orientierungsverfahren werden beschrieben und jüngste Ergebnisse der direkten Geo-Referenzierung werden präsentiert.

In diesem Zusammenhang soll auch die langjährige Zusammenarbeit der Firmen

IGI und Hansa Luftbild, Bereich Flugbetrieb, gewürdigt werden, welche sich bereits sehr frühzeitig mit der Navigation von Luftfahrzeugen, aber auch deren Positionierung in der praxisnahen Anwendung auseinandersetzen (HERMS 1991).

2 Gebräuchliche Flugzeug-gestützte Sensoren

Flugzeug-gestützte Sensoren bieten heute eine enorme Bandbreite an Einsatzmöglichkeiten. Diese hängen vorwiegend von den verwendeten Spektralbereichen ab. Zu den aktiven Sensoren zählen überwiegend Radarsysteme und in den letzten Jahren verstärkt Laser-Distanzmessungssysteme. Die passiven Sensoren nutzen die Strahlungsreflektion der natürlichen Strahlungsquellen. Hierunter fallen die konventionellen Filmkameras, aber auch das gesamte Spektrum der digitalen Aufzeichnungssysteme, welche bis zum Hyperspektralscanner reichen, bei dem mehrere hundert Kanäle aufgezeichnet werden können. Im Weiteren wird sich hier ausschließlich auf Filmkameras (Abb. 1), digitale Kameras im sichtbaren und nahen infraroten Bereich (Abb. 2), Laser Scanning Systeme (Abb. 3) und auf Thermalscanner (Abb. 4) beschränkt, da diese Sensoren in der Anwendung am weitesten verbreitet sind.

Allen Flugzeug-gestützten Sensoren ist gemeinsam, dass die aufgezeichneten Informationen in Bezug zu einem übergeordneten



Abb. 1: Filmkamera RMK TOP (Z/I Imaging) mit inertialer Messeinheit AEROcontrol (IGI).



Abb. 2: Digitale Kamera ALTM 4K02 mit Steuereinheit (Optech).



Abb. 3: Airborne Laser Scanner Typ ALTM 2050 (Optech).



Abb. 4: Thermalscanner in Cessna 402.

Koordinatensystem, in der Regel ein nationales oder internationales Referenzsystem, gebracht werden müssen. Hier spricht man heute von einer Geo-Referenzierung der erfassten und aufgezeichneten Sensorinformationen.

3 Geo-Referenzierung

3.1 Indirekte Geo-Referenzierung

Das Verfahren der indirekten Geo-Referenzierung von Sensorinformationen war bis vor wenigen Jahren das gebräuchlichste. Der wesentliche Grund hierfür waren die extrem hohen Kosten der inertialen Messeinheiten zur Bestimmung der räumlichen Drehwinkel bei hinreichend hoher Auflösung und Genauigkeit. Deshalb wurden die indirekten Verfahren in den letzten 4 Jahrzehnten nahezu perfektioniert. Insbesondere im Bereich der Filmkameras hat sich die Aerotriangulation zu einem Standardwerkzeug der Bestimmung der Parameter der äußeren Orientierung entwickelt. Die mathematischen Modelle wurden extrem hoch entwickelt (SCHROTH 1985), die Robustheit der Bündelblockausgleichung gegenüber groben Fehlern macht die Verfahren sicher und stabil (FÖRSTNER & KLEIN 1981), und letztendlich führte die Integration zusätzlicher Beobachtungen auf der Basis von DGPS zu einer erheblichen Reduktion an Passpunkten im Referenzsystem, was einen signifikanten Rationalisierungseffekt bewirkte. Seit Beginn der 90er Jahre des letzten Jahrhunderts bekam im Zuge der Entwicklung der digitalen Photogrammetrie die Automatisierung der Aerotriangulation einen hohen Stellenwert (HEUCHEL et al. 1996). Heute kann man sagen, dass dieses Verfahren der digitalen Aerotriangulation sich in weiten Teilen der Praxis bereits etabliert hat und entsprechend robust und zuverlässig ist. Der damit verbundene Rationalisierungseffekt ist extrem hoch.

Das indirekte Verfahren der Sensororientierung hat aber seine klaren Grenzen. Zum einen wurde es überwiegend nur für optische Kamerasysteme (Film- bzw. digitale Kameras) entwickelt und zum anderen versagt es vollständig, wenn kontrastarme Räume (z.B. große Wasserflächen oder extreme Wüstengebiete) zu überbrücken sind.

3.2 Direkte Geo-Referenzierung

Durch die direkte Geo-Referenzierung können Sensor- oder Objektdaten unmittelbar



Abb. 5: Prinzip der direkten Geo-Referenzierung; Lage (X,Y,Z) und Orientierung (ω , ϕ , κ) werden im Flug mittels GPS/IMU erfasst.

in ein lokales oder globales Koordinatensystem überführt werden, in dem dann weitere Auswertungen möglich sind (Abb. 5).

Ein solches Positionierungs- und Orientierungssystem besteht aus Empfängern des Globalen Positionierungssystems (GPS) im Flugzeug und am Boden und einer mit dem Sensor verbundenen inertialen Messeinheit (IMU), welches die Winkelbewegungen und Beschleunigungen des Sensors hochgenau misst. Hansa Luftbild verwendet das GPS/IMU-System AEROcontrol der Firma IGI, Kreuztal. Die Komponenten sind:

- Inertiale Messeinheit (IMU)
- 12-Kanal L1/L2 GPS-Empfänger
- AEROcontrol Computer
- Flugführungs- und Managment-System CCNS4
- GPS-Referenzstation



Abb. 6: GPS/IMU System AEROcontrol (IGI).

Spezifizierte Genauigkeiten des Systems:

- Lage: $< 0,1$ m (RMS)
- Höhe: $< 0,2$ m (RMS)
- $\omega, \varphi < 0,005$ deg (RMS)
- $\kappa < 0,01$ deg (RMS)

4 Ergebnisse der direkten Geo-Referenzierung

Hansa Luftbild besitzt seit vielen Jahren Erfahrungen mit direkter Geo-Referenzierung mittels GPS/IMU Systemen. Laserscanner werden schon länger erfolgreich mit integrierten GPS/IMU Systemen eingesetzt. GPS Empfänger und IMU bilden mit dem Laserscanner zusammen eine kompakte Funktionseinheit. Mittels Kalibrierfeldern werden bei Laserscanner-Befliegungen Genauigkeiten im Dezimeterbereich erzielt.

Zurzeit wird bei Hansa Luftbild der neue ALTM 2050 Laserscanner (Optech) in Zusammenarbeit mit der Firma TopScan in Betrieb genommen. Darin ist eine digitale Mess-Kamera mit einem $4k \times 4k$ -Sensor für Color- und Colorinfrarotaufnahmen integriert (Abb. 2 und Abb. 3).

Die dreifache Kombination der Sensoraufnahmen von Laserdaten, GPS/IMU und digitalem Bild ermöglicht die direkte Produktion von Orthophotomosaiken, sogar True-Ortho-photos sind möglich. Sämtliche hierzu notwendigen Informationen werden mit diesem System simultan erfasst (Höhenmodell, Luftaufnahmen und Georeferenzierung). Auch traditionelle Stereobilder können bei ausreichender Überdeckung der Aufnahmen und exakter Kalibrierungen erstellt werden.

Die Pixelgröße des CCD-Sensors beträgt $9 \mu\text{m}$. Für typische Flughöhen während einer Laserscanner-Befliegung wird eine Bodenaufklärung von ca. 15 cm erreicht, für viele GIS- und Mapping-Anwendungen eine durchaus akzeptable, schnelle und vor allen Dingen kostengünstige Alternative.

Seit ca. 3 Jahren ist das modulare GPS/IMU System AEROcontrol der Firma IGI, Kreuztal, bei Hansa Luftbild im Einsatz. Es ist besonders flexibel in der Anwendung und kann mit beliebigen Sensoren kombiniert



Abb. 7: Thermalaufnahme (direkte Geo-Referenzierung mittels AEROcontrol).

werden. Der Einbau und die Adaption an vorhandene Sensoren sind in wenigen Minuten durchgeführt. Abb. 4 zeigt einen Thermalscanner, welcher zusammen mit dem AEROcontrol eingesetzt wird. Abb. 7 zeigt einen Ausschnitt einer Thermalbefliegung, bestehend aus 6 Flugstreifen. Die mittlere Flughöhe betrug etwa 750 m, die Fluggeschwindigkeit über Grund etwa 130 kn. Die Bilddaten haben eine räumliche Auflösung von 1,5 m. Die Temperaturen sind von -4°C bis $+2^\circ\text{C}$ dargestellt (von kalten zu warmen Temperaturen: Blau über Grün, Gelb, Orange, Rot zu Magenta).

Bei der Geo-Referenzierung von Luftbildern wird immer öfter auch die direkte Geo-Referenzierung eingesetzt. Dieser Prozess entspricht der Bestimmung der Elemente der Äußeren Orientierung in der Photogrammetrie (Lage und Orientierung: X, Y, Z, ω , φ , κ). Traditionell werden diese Werte meistens im Rahmen der Aerotriangulation (AT) durch simultane Bündelblockausgleichung berechnet. Je nach Blockgröße ist dazu eine größere Anzahl im Luftbild sichtbarer Passpunkte notwendig. Ihre Koordinaten müssen im Zielkoordinatensystem bekannt sein, bzw. bestimmt werden. Dieser Prozess ist zeitaufwändig und damit kostspielig. Durch das Verfahren der Direkten Geo-Referenzierung kann besonders die Anzahl der Passpunkte und damit die Arbeit im Gelände wesentlich reduziert, bzw. ver-

einfacht werden. Die Elemente der Äußeren Orientierung als Ergebnis der direkten Geo-Referenzierung können sowohl direkt eingesetzt werden, z. B. bei der Einzelbildorientierung oder auch indirekt zur Verbesserung der Näherungswerte bei einer anschließenden Aerotriangulation.

Bei Hansa Luftbild wurden in Kombination mit der Filmkamera Zeiss RMK TOP (Abb. 1) bisher über 15 000 Aufnahmen mit dem AEROcontrol-System direkt geo-referenziert. Die Befliegungsmaßstäbe reichen von 1 : 3 000 bis hin zu 1 : 30 000. Hansa Luftbild erreicht durch GPS/IMU-Befliegungen eine sehr schnelle und kostengünstige Pro-

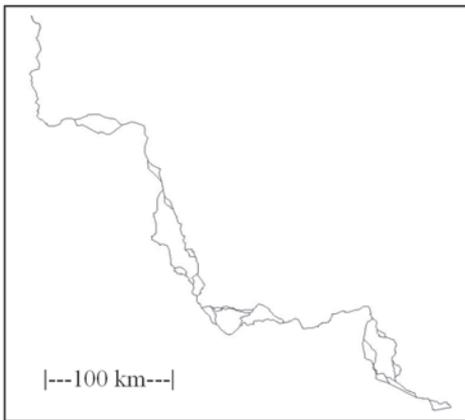


Abb. 8: Pipeline-Trasse (ca. 650 km).

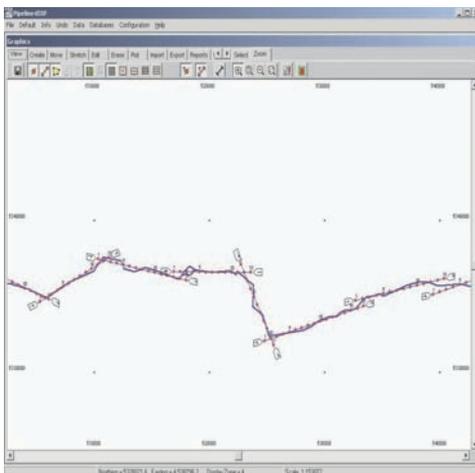


Abb. 9: Ausschnitt Pipeline-Flugplanung. (Software WinMP, IGI).

jektentwicklung. Abb. 8 zeigt eine im Jahr 2002 beflogene Pipeline-Trasse mit einer Gesamtlänge von ca. 650 km (Befliegungsmaßstab 1 : 6000). Diese Befliegung konnte ohne Passpunkte oder Stabilisierung durch zusätzliche Flugstreifen durchgeführt werden. Die Orthophoto-Herstellung konnte somit direkt nach dem Scannen der Aufnahmen in kurzer Zeit fertiggestellt werden. Abb. 9 zeigt einen Ausschnitt aus der zugehörigen Flugplanung. Es wurde nur entlang der Trasse befliegen, ohne Blöcke zu bilden.

Die Befliegung einiger großer Auslandsprojekte von Hansa Luftbild wurde auch im Jahr 2003 mit dem AEROcontrol-System durchgeführt. In vielen Gebieten wäre eine konventionelle Befliegung aus verschiedenen Gründen nicht ohne weiteres möglich gewesen. Die großen Vorteile zeigten sich vor allem in den Küstenbereichen, wo auf den Aufnahmen größtenteils nur Wasser oder kleine Inseln zu finden sind. Ebenso erleichterte es die Orthophoto-Herstellung für die Wüstengebiete. Für viele derartige Gebiete oder in schlecht zugänglichen Bereichen war das AEROcontrol oft die einzige Möglichkeit, die Aufnahmen zu geo-referenzieren.

5 Schlussbemerkungen

Der Einsatz von GPS/IMU zur direkten Geo-Referenzierung ist für abtastende Systeme (Laserscanner, CCD-Zeilenscanner etc.) derzeit Standard. Ein praktikabler Einsatz wäre ohne diese Technik nicht möglich. Aktuelle Entwicklungen bei digitalen Mess-Kameras integrieren ebenfalls GPS/IMU Systeme.

Bei den konventionellen Luftbildaufnahmen ist die Aerotriangulation zur Zeit noch das Verfahren der Wahl, um einen homogenen Bildverband zu garantieren. Die direkte Geo-Referenzierung konnte aber auch hier schon Teilbereiche erobern.

Ständige Verbesserungen der GPS/IMU Systeme sind festzustellen. Die Abstraten liegen beim AEROcontrol mittlerweile bei 128 Hz. Die neuen Kreiselssysteme bestehen aus faseroptischen Gyros und basieren auf hochgenauen, interferometrischen Messver-

fahren. Auch die Durchführung von GPS/IMU-Befliegungen wurde im Laufe der Zeit immer weiter optimiert. Anfangs verwendete Allround-Kalibrierfelder werden nicht mehr verwendet. Es kommen nur noch speziell an den jeweiligen Bildflug angepasste Kalibrierfelder zum Einsatz. Auch die Bestimmung des Misalignments konnte weiter verbessert werden.

Durch die direkte Geo-Referenzierung können viele Anwendungen effizienter und wirtschaftlicher realisiert werden.

Literatur

- ACKERMANN, F., 1974: Accuracy of Stascope Data – Results from the OEEPE-Test „Oberschwaben“. – Proceedings of ISP Comm. III Symposium 1974, DGK Reihe B, Heft 214: 280–286.
- FÖRSTNER, W. & KEIN, H., 1981: Strategien für die Fehlersuche in der Aerotriangulation. – Vorträge des Lehrganges Numerische Photogrammetrie (IV), Stuttgart, 91–110.
- FRIESS, P., 1990: Kinematische Positionsbestimmung für die Aerotriangulation mit dem NAVSTAR Global Positioning System. – DGK, Reihe C, Heft 359.
- HERMS, P., 1991: Einsatz von CCNS/GPS und RMK TOP – Neue Erfahrungen und Überlegungen zur Bildflugnavigation. – Vorträge der 43. Photogrammetrischen Woche, Stuttgart, 73–78.
- HEUCHEL, T., KRZYTEK, P., HIRT, U. & PETRAN, F., 1996: Automatic Aerial Triangulation – Integrating automatic point selection, point transfer and block adjustment. – Proceedings of ACSM/ASPRS conference, Baltimore.
- SCHROTH, R., 1985: Ein erweitertes mathematisches Modell der Aerotriangulation zur hochgenauen Punktbestimmung. – DGK, Reihe C, Heft 316.

Anschriften der Autoren:

Dr. rer. nat. FRANK DREESEN,
Hansa Luftbild Sensorik und Photogrammetrie
GmbH, Elbestr. 5, D-48145 Münster
Tel.: 49-251-2330-0, Fax: 49-251-2330-112
e-mail: dreesen@hansaluftbild.de

Prof. Dr.-Ing. RALF SCHROTH
Hansa Luftbild Sensorik und Photogrammetrie
GmbH, Elbestr. 5, D-48145 Münster,
Tel.: 49-251-2330-0, Fax: 49-251-2330-112
e-mail: schroth@hansaluftbild.de

Manuskript eingereicht: April 2003
Angenommen: Mai 2003

Paradigmenwechsel in der Photogrammetrie durch digitale Luftbildaufnahme?

MICHAEL GRUBER, FRANZ LEBERL & ROLAND PERKO, Graz, Österreich

Keywords: photogrammetry, aerial photography, large format digital camera, sensor modeling, electronic imaging

Summary: *Digital Aerial Photography – reason for a change of paradigm?* We describe the UltraCam-D large format digital aerial camera system as a contribution to end the role of aerial film. We discuss the persuasive advantages of digital sensors, which result from replacing film by pixel arrays. But we also address the most interesting aspect of the new technology, representing a „paradigm shift“ away from the 100 years of minimizing the number of aerial images for a given accuracy goal. This will be replaced by the use of redundant images for the optimization of the robustness of procedures, the success of automation and the increase of geometric accuracy.

This invitation to acquire redundant data results from the lack of any costs for film, photo processing and scanning. However, to take full advantage of this redundancy the photogrammetric work flow must become totally digital and software must get enhanced to deal with this type of redundant data. Because of the economic disadvantage and the inability to provide this type of redundancy, the use of film in aerial photogrammetry may no longer be of interest.

Zusammenfassung: Wir beschreiben das neue digitale Großformat-Kamerasystem UltraCam-D als einen Beitrag zur Verdrängung des Luftbildfilmes. Wir behandeln die überzeugenden Vorteile digitaler Sensorik in der Luftbildmessung, welche sich durch das einfache Ersetzen von Film durch Pixelbilder ergibt. Aber dazu besteht ein interessanter, vielleicht der interessanteste Aspekt dieser neuen Technologie in einem „Paradigmenwechsel“, weg von der seit mehr als 100 Jahren angestrebten geringsten Anzahl von Filmbildern zur Erreichung eines geometrischen Genauigkeitszieles. Stattdessen wird die Nutzung einer beliebigen Redundanz von Bildern möglich, die zur Erhöhung der Robustheit von Verfahren, zur besseren Automatisierung und zur Steigerung der Genauigkeit führen wird.

Diese „Einladung zur Redundanz“ ergibt sich aus dem Wegfall aller Kosten für Film, Farbe, Filmverarbeitung und aus dem Verfall der Notwendigkeit, Bilder scannen zu müssen. Damit die Redundanz im photogrammetrischen Arbeitsprozess zur Wirkung kommen kann, müssen die photogrammetrischen Softwarepakete erweitert und die Arbeitsprozesse sehr viel mehr als bisher völlig digital werden. Film ist dann erstens wegen seiner Unwirtschaftlichkeit und kompromittierten Bildqualität als auch zweitens wegen seiner Redundanz-Behinderung nicht länger interessant.

1 Einleitung

Wenige Verfahren der weitläufigen Gebiete der Informationsverarbeitung haben ihre analogen Wurzeln so vehement verteidigt wie die großformatige Luftbildaufnahme. Das ist einerseits verständlich, wenn deren

hohe Qualität und das beeindruckende Format und der daraus resultierende Informationsinhalt beurteilt werden. Andererseits ist der analoge Film zum Anachronismus in einer nahezu vollständig digitalen, photogrammetrischen Verarbeitungskette geworden. Es gibt mehrere Gründe für diese kon-

servative Haltung, allen voran die Tatsache, dass die analoge Aufnahmetechnologie gut eingeführt ist, der Umgang mit analogem Film beherrscht wird und die Entwicklung kostengünstiger Kameras bisher nicht gelungen ist.

Digitale Luftbildkameras sind allerdings seit etwa dem Jahr 2000 ein ernstzunehmendes Diskussionsthema, als LH-Systems (heute Leica Geosystems) und Z/I Imaging ihre Digitalsysteme ADS-40 und DMC und Emmerge eine kleinformatige 16 Mpixel große Luftbildkamera vorstellten. Zunächst verpuffte dies ohne Wirkung auf die Rolle des Luftbildfilmes in der photogrammetrischen Bildgebung und neue Filmkameras wurden in etwa derselben Rate verkauft wie zuvor. Es war auch kein Verfall der Preise für gebrauchte Luftbildkameras festzustellen, der ab dann zu erwarten ist, wenn der Markt meint, dass nun Digitalkameras den Filmkameras den Rang ablaufen und alles Neue nur mehr digital sein werde.

Woran scheiterte bisher der Übergang zur Digitalsensorik in der Luftbildmessung? Das mag unter anderem an der Kleinheit des Photogrammetrie-Marktes liegen, der sich nur als „Trittbrettfahrer“ der allgemeinen Computer-Innovationen erneuern kann, und dessen Innovationskraft daher durch enge Entwicklungs-Budgets begrenzt ist. Und es mag am Fehlen zündender neuer Ideen liegen, so dass vorhandene Computer-Innovationen nur ungenügend zur Wirkung gebracht werden, weil Anbieter in traditionellen mechanisch-optischen Prinzipien und daher in hohen Kosten verhaftet bleiben.

Es gilt nun, ein Szenario zu entwerfen, das technisch und wirtschaftlich Vorteile beim Wechsel zur digitalen Luftbilddaufnahme beinhaltet. Der vorliegende Beitrag versucht, diese Vorteile zu orten und darüber hinaus neue Potentiale zu erkennen, die sich aus der digitalen Luftbilddaufnahme entwickeln lassen. Basis für die nachfolgenden Überlegungen ist das digitale Luftbilddaufnahmesystem UltraCamD, das von Vexcel Imaging Austria kürzlich vorgestellt wurde (LEBERL et al. 2003). Die Qualität der damit erstellten Bilddaten, die Einsatzkriterien für den Bildflug und die Wirtschaftlichkeit in der Anschaf-

fung und im Betrieb werden mit anderen analogen und digitalen Systemen verglichen. Damit suchen wir klarzustellen, dass die Wirtschaftlichkeit konsequenter Digitaltechnik mit Qualitätssteigerungen der Ergebnisse konspiriert, um die weitere Nutzung von Luftbildfilm zu beenden.

Aber in der neuen Digitalsensorik steckt mehr Potential als nur ein Ersatz von Luftbildfilm, Fotolabor und Scanner. Wir argumentieren, dass die neue Digitalsensorik zu einer völlig veränderten Sichtweise der Begriffe „Robustheit“, „Automatisierung“ und „Genauigkeit“ führen wird. Damit bricht die Zeit an, in der alle analytischen und analogen Systeme stillgelegt und alle photogrammetrischen Verarbeitungsketten auf eine völlig digitale Produktion umgestellt werden. Die Hoffnungen, welche seit Jahrzehnten bei Bemühungen zur automatischen Bildauswertung enttäuscht wurden, haben nun die Chance auf Erfüllung.

Wir sprechen vom Verlassen der „Ideologie der Bildzahl-Minimierung“ in der Photogrammetrie und der Hinwendung zur „Robustheits-Maximierung“ durch Redundanz in der Bildgebung. Zentrales Element der Kosten eines Photogrammetrie-Prozesses ist heute die Anzahl der zu verarbeitenden Film-Bilder und der Art des Filmes (Negativ vs. Positiv, Farbe vs. Schwarz-Weiß, Echt- vs. Falschfarbe). Es gibt kaum ein Photogrammetrie-Unternehmen, welches wirklich konsequent auf automatische Verfahren setzt. Die analytischen Plotter sind noch immer in Verwendung, in jeder photogrammetrischen Abteilung wird Film stereoskopisch verarbeitet. Dies sollte durch neue Kameras verändert werden.

Die neue Digitaltechnik der Luftbildkameras lädt ein, die Bildzahl als Faktor in der Photogrammetrie zu ignorieren. So wird der Aufwand nicht länger durch die Zahl der Bilder bestimmt, sondern ausschließlich durch den Erfolg automatischer Verfahren und damit der Vermeidung manueller Korrekturen beim Versagen automatischer Verfahren. Und hier spielt die Maximierung der Robustheit von Verfahren und der Erfolg der Automatisierung durch Nutzung von geeigneten Redundanzen in den Bilddaten

eine große Rolle. Bilder werden kostenlos erzeugt und im automatischen Verfahren kostenlos bearbeitet. Die direkte Messung der äußeren Orientierung ergänzt das bildgestützte Verfahren. Das Ergebnis ist ein robuster, hochautomatischer Prozess.

Kosten entstehen nur durch manuelle Eingriffe in den Datenfluss. Es gilt, diese Eingriffe zu minimieren und den Parameter „Bildanzahl“ frei zu geben.

2 Digitale Bilddaten und analoger Film

Eine wesentliche Grundlage für die vergleichende Bewertung von analoger und digitaler Luftbildaufnahme bildet die Gegenüberstellung elektro-optisch generierter digitaler Bilddaten mit analogem Filmmaterial. Diese Bewertung kann nach geometrischen und radiometrischen Kriterien durchgeführt werden, wobei photogrammetrische Anforderungen an das Bildmaterial besonders zu berücksichtigen sind.

In der Digitalkamera ist die Pixelgröße fest vorgegeben. Dies sind $9\ \mu\text{m}$ in der Bildebene der neuen UltraCam-D, welche durch die Objektivbrennweite und Flughöhe in eine eindeutige Bodenauflösung (Ground Sampling Distance GSD) umzurechnen ist. Anders im Film. Dieser hat einen festen Bildmaßstab, aber keine feste Pixelgröße und damit auch keine feste GSD. Pixelgröße entsteht durch die oft unbekümmerte Wahl des Abtastpixels, und von einem und demselben Filmbild können Digitalversionen unterschiedlichster Pixelgrößen hergestellt werden. Es gilt also, nicht nur den Informationsverlust durch einen entsprechend hohen Qualitätsanspruch an den Abtastvorgang zu verhindern, sondern auch jene Abtastpixelgröße festzulegen, welche dem Filmbild gerecht wird.

Wir argumentieren, dass einem 23 cm breiten Filmbild eine digitale Pixelzeile mit 11 500 Elementen Paroli bietet, dass also in den 11 500 Digital-Pixeln mehr Information steckt als in der 23 cm breiten Filmzeile. Damit wäre dies ein äquivalentes Abtastpixel von $20\ \mu\text{m}$. Aber selbst bei $15\ \mu\text{m}$ des Film-Abtastpixels enthält die Digitalzeile mit

11 500 Elementen mehr Information als die 15 000 gescannten Filmpixel. Diese überraschende Aussage wird im Folgenden belegt. In der Literatur bestehen hierzu Aussagen, welche den Zusammenhang zwischen radiometrischer Leistung und geometrischer Auflösung untersuchen (CHEN et al. 2000).

2.1 Siemensstern

Wir berichten von einem Versuch mit einer genormten Auflösungsvorlage. Abb. 1 zeigt einen Siemensstern, der mit AGFA APX Film mittels Rolleimetric Kamera aufgenommen wurde. Das Filmbild wurde mit $10\ \mu\text{m}$, $15\ \mu\text{m}$ und anderen Pixelgrößen abgetastet. In Abb. 1 führen diese Abtastungen mit $10\ \mu\text{m}$ und $15\ \mu\text{m}$ zu Pixelgrößen im Objekt, also zu einem Wert für die GSD in der Vorlage mit dem Siemensstern, von 0,34 mm und 0,51 mm. Das Digitalbild aus Abb. 1 hat eine GSD von 0,4 mm. Lassen wir nun ein Verfahren über diese Bilder laufen, welches den Grenzradius für den „kritischen Kreis“ berechnet, so erhalten wir für Film 9,0 mm (bei $10\ \mu\text{m}$ Abtastung) und 9,5 mm (Abtastung mit $15\ \mu\text{m}$), aber mit der Digitalkamera wird ein Radius von 4,9 mm ermittelt. Der Zusammenhang zwischen Pixelgröße und kritischem Radius ist keinesfalls linear. Das Digitalbild löst besser auf, auch wenn der GSD-Wert gegenüber einem Filmbild gröber ist.

Grund für diese hohe Leistung des Digitalbildes ist in erster Linie das Fehlen jeglichen Kornrauschens, das in Abb. 1 in der Einblendung sichtbar gemacht wird. Dieses Rauschen erzeugt im Filmbild eine künstliche Textur, welche im Objekt gar nicht besteht. Ein zweiter Vorteil des Digitalbildes ist der höhere Dichteumfang mit 12 Bits per Pixel versus den kaum 8 Bits/Filmpixel. Dieser zweite Vorteil kommt in einem Bild mit nur zwei Grauwerten, wie dies in Abb. 1 der Fall ist, nicht deutlich zur Geltung. Dazu sei ein Geländebild untersucht.

2.2 Luftbild

Das in Abb. 2 vorgestellte Detail einer Siedlung mit Wohnhäusern, Gartenanlagen und

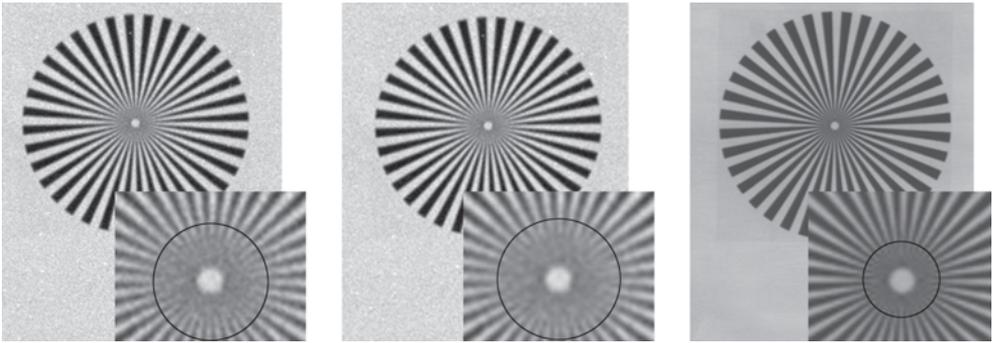


Abb. 1: Film- und Digital-Aufnahmen eines Siemenssterns. Das Filmbild wurde mit 10 μm und 15 μm Pixels abgetastet (GSD von 0,34 und 0,51 mm). Das Digitalbild erzeugt Pixel mit 0,4 mm Seitenlänge im Objekt. Der kritische Kreisradius für die geometrisch aufgelösten Bildteile beträgt 9,0 und 9,5 mm für Film und 4,9 mm für das Digitalbild. Pixelgröße und geometrische Auflösung sind zwischen Film und Digitalsensor nicht linear vergleichbar, weil andere radiometrische Gegebenheiten bestehen.

Verkehrsflächen wurde im Abstand von wenigen Tagen im Sommer 2002 aufgenommen. Der Bildmaßstab ist in beiden Fällen ca. 1:12000, die Abtastung des analogen Filmmaterials wurde mit 2032 dpi (12,5 μm Pixelgröße) vorgenommen, die Auflösung am Boden beträgt in beiden Fällen ca. 15 cm. Auffällig ist die wesentlich bessere

Detailzeichnung und die überlegene radiometrische Qualität der digitalen Aufnahme gegenüber dem analogen Material. Eingebildet in die Bildausschnitte sind Vergrößerungen um einen Faktor 2, um die Wirkung des Kornrauschens im Film und der besseren Radiometrie im digital aufgenommenen Bild zu verdeutlichen.



Abb. 2: Analoge und digitale Luftbildaufnahmen im direkten Vergleich. Die analoge Aufnahme vom 6. Juli 2002 auf AGFA X 100 Farbnegativfilm zeigt wesentlich weniger Details als die digitale Aufnahme vom 9. August 2002. Die Detailvergrößerung zeigt in beiden Fällen einen Bildkreis mit einem Durchmesser von 210 Pixel oder 31 Meter in 2-facher Vergrößerung.

2.3 Stereoskopie

Zwei Probleme behindern die erfolgreiche automatische Erstellung von Digital Elevation Models DEM: Erstens kommt es wiederholt zu Ausfällen wegen ungenügender Korrelation, so dass keine Höhenwerte berechnet werden konnten. Manuelle Eingriffe sind notwendig, um solche Geländestücke mit Daten zu füllen. Zweitens kommt es zu Ausreißern durch Fehlüberlagerungen (Mismatches), welche zum Teil manuell zu suchen und zu eliminieren sind.

Die Abb. 3 und 4 stellen die Korrelationsergebnisse von analogen und digitalen Bildpaaren gegenüber. Es wurde dabei je ein Oberflächenbereich mit sehr schwacher Struktur ausgewählt. Im Fall des Gebäudebildes wurde ein Raster von 100 Messpunkten durch Bildvergleich ermittelt. Die Korrelationskoeffizienten und die Anzahl der durch stereoskopische Betrachtung als fehlerhaft ermittelten Messpunkte werden als Merkmale für einen quantitativen Vergleich herangezogen.

Abb. 4 betrifft das Luftbildbeispiel. Die Abtastung mit $10\ \mu\text{m}$ führt zu einer großen Zahl an Ausreißern, weil nicht Objektmerkmale, sondern zufällig angeordnete Filmkörnung zur Überlagerungsberechnung (Matching) herangezogen wird. Die Filmbilder aus Abb. 4 wurden im Maßstab 1:15000 geflogen. Eine Abtastung mit $10\ \mu\text{m}$ Pixeln führt zu einer GSD von 15 cm. Ohne diese Ausreißer ergibt sich aus $10\ \mu\text{m}$ Pixeln ein Rauschen der Parallaxenwerte im Objekt von ± 2 bis ± 8 cm. Eine Abtastung mit $20\ \mu\text{m}$ Pixeln reduziert die Zahl der Ausreißer. GSD wird 30 cm. Und doch verringert sich das Rauschen auf ± 2 cm bis ± 6 cm. Das Digitalbild wird mit einer GSD von 17 cm erfasst. Das Match-Rauschen ist dabei nur ± 1 cm bis ± 2 cm. Diese Genauigkeitsunterschiede sind auch durch die entsprechenden Korrelationsmaße r belegt. Bei $10\ \mu\text{m}$ Scans wird mit $r = 0,29$ korreliert, mit $20\ \mu\text{m}$ erhöht sich dies auf $r = 0,52$. Im Digitalbild wird es aber noch wesentlich höher, nämlich $r = 0,81$.



Abb. 3: Korrelationsergebnisse an einer schwach strukturierten Gebäudefassade (links) zeigen deutlich die Überlegenheit der digitalen Aufnahme. Das Filmbildpaar (Rolleimetric 6006, $c = 150$ mm, AGFA APX) wurde mit $20\ \mu\text{m}$ Pixelgröße (GSD = 1 cm) abgetastet, das digitale Bildpaar mit $c = 48$ mm und einer Pixelgröße von 1,7 cm (GSD) aufgenommen. Die Streuungen bei den Horizontalparallaxen bei 100 Messpunkten betragen etwa $1/3$ Pixel oder ± 3 mm beim analogen und $1/10$ Pixel oder $\pm 1,7$ mm beim digitalen Beispiel (rechts unten).

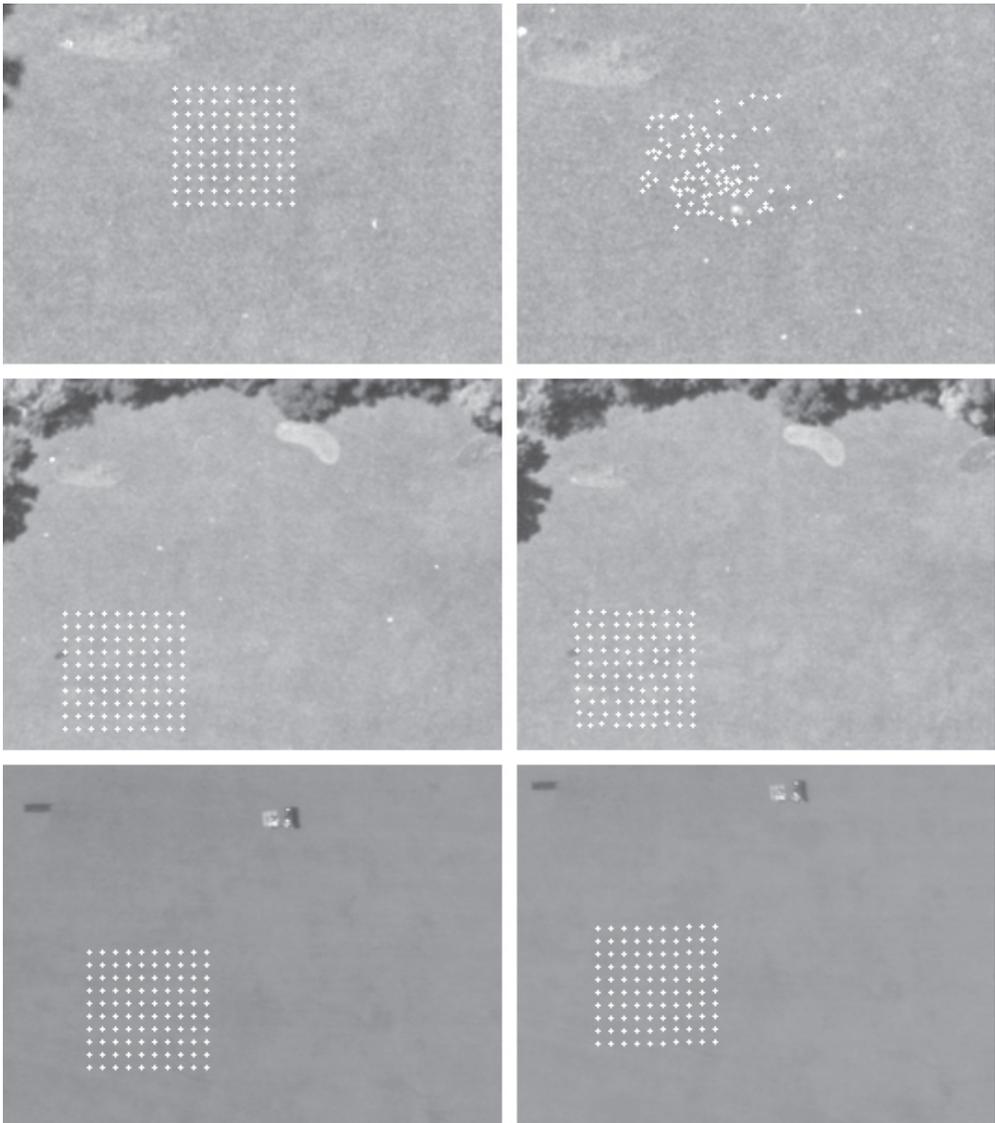


Abb. 4: Korrelationsergebnisse in wenig strukturierten Geländebereichen. Analoge Luftbildaufnahmen (AGFA X100) werden einem digitalen Bildpaar gegenübergestellt. In jeden Fall beträgt der Bildmaßstab ca. 1 : 15000. Die Korrelationsergebnisse führen im Falle der digitalen Aufnahme zu 2 bis 3fach besseren Streuungswerten als im Falle der analogen Aufnahmen. Oben: Film, 10 μ m Pixel (GSD 15 cm). Mitte: Film, 20 μ m Pixel (GSD 30 cm). Unten: Digital, GSD 17 cm.

Abb. 5 fasst das Ergebnis einer terrestrischen Bildüberlagerung zusammen. Ein Bildpaar einer Gebäudegruppe auf Film und ein weiteres Bildpaar mit dem Digital-sensor UltraCam ergibt Abb. 5 als Darstel-

lung der Abweichungen des im 2. Bild gefundenen Matchpunktes vom Kernstrahl als Genauigkeitsmaß. Diese Abstände sind im Filmbild 2,5-mal größer als im Digitalbild.

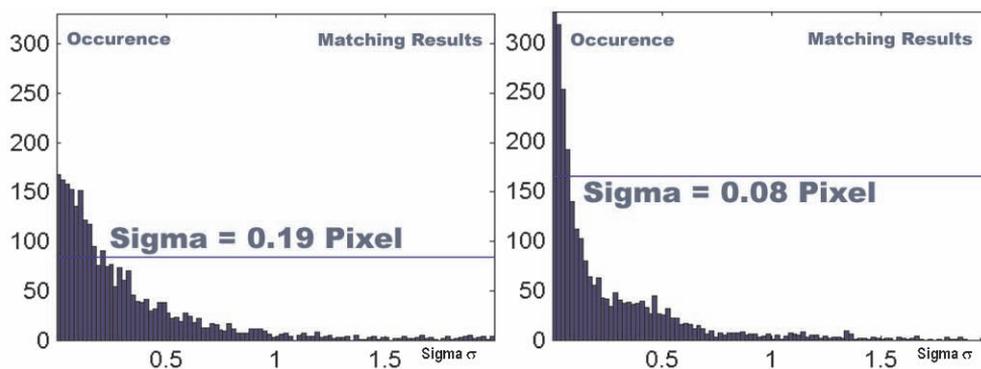


Abb. 5: Die Abweichung vom Kernstrahl kann als Unsicherheit der Bildüberlagerung interpretiert werden. Im gescannten Filmbild ist diese Abweichung im gezeigten Beispiel mit $\pm 0,19$ Pixeln um einen Faktor 2,5 größer als im UltraCam-Digitalbild mit $\pm 0,08$ Pixeln.

2.4 Wirtschaftlichkeit

Die Einsparungen durch die digitale Luftbildaufnahme sind vielfältig. In Tab. 1 wird versucht, einige Einsparungen darzustellen, wobei der Wegfall von Film- und Filmentwicklungskosten die offensichtlichste Einsparung verursacht, gefolgt von der Vermeidung jeglichen Aufwandes für die Filmabtastung. Ein Schlüssel der erhöhten Wirtschaftlichkeit ist die völlige Umstellung des photogrammetrischen Arbeitsflusses von den bisher üblichen hybriden Pixel/Film-Kombinationen auf ein strikt digitales System. Erst damit können logistische Vereinfachungen in vollem Ausmaß realisiert werden. Denn dann entfällt die Filmlagerhaltung und der Umgang mit Filmkopien und gegebenenfalls die Erstellung von Filmvergrößerungen.

3 ULTRACAM_D, die digitale Großformatkamera

3.1 Die Kamera

In Abb. 6 ist das gesamte System der UltraCam-D dargestellt mit dem Sensor SU, der Speicher- und Prozesseinheit SCU und der Konsole für das interaktive Management des Systems im Flug. Tab. 2 fasst die Spezifikationen des Systems zusammen.

Tab. 1: Einige der Faktoren der erhöhten Wirtschaftlichkeit digitaler Luftbildkameras. Die Finanzierung einer Digitalkamera wird mit weniger als 20000 Luftbildern möglich. Die Abschreibung der Digitalkamera beruht auf einem mit der traditionellen Filmkamera vergleichbaren Anschaffungspreis.

- **Wegfall/Entfall**
 - Filmanschaffungen
 - Filmlagerhaltung
 - Kosten für die Filmentwicklung
 - Filmabtastung
 - Filmarchiv; Ersetzen mittels digitaler Bild-datenbank
 - aller Kopierarbeiten
 - kostspielige Flugwiederholungen, da eine Qualitätskontrolle in Echtzeit während des Fluges durchgeführt werden kann.
- **Verringerung**
 - der manuellen Eingriffe in die Aerotriangulierung durch verbesserte Bildüberlagerung
 - der manuellen Eingriffe zur Korrektur von Fehlern in Höhenmodellen
- **Erhöhung**
 - der Bilderfassungskapazität pro Bildflug
 - der Anzahl Flugtage durch erhöhte Radiometrieleistung
 - des Durchsatzes bei Vegetationskartierungen durch Bildklassifizierung mit 5 Spektralkanälen (R, G, B, NIR, panchromatisch)
- **Gleichzeitige**
 - Erstellung von panchromatischen Bildern
 - Erstellung von Farbbildern
 - Erstellung von Falschfarbbildern

Abb. 7 zeigt eine Ansicht der Sensoreinheit mit ihren 8 Objektiven.

Schnittstellen zu den Navigationssystemen *CCNS4* und *AEROcontrol* der Firma IGI mbH erlauben ein professionelles Flugmanagement und die Durchführung der direkten Georeferenzierung.

3.2 Zur Befliegung

Die Befliegung mit UltraCam-D unterscheidet sich nicht von einer Befliegung mit einer traditionellen Filmkamera. Es ist dieselbe Zahl von Fluglinien zu befliegen. Wird etwa ein Gebiet von 10 km × 10 km im Maßstab 1 : 10000 befliegen, so ergeben sich im Film- und Digitalfall dieselben 6 Flugstreifen mit einer Breite von 2,3 km (= 23 cm Bildformat mal Maßstab). Das Ergebnis besteht allerdings wegen des Bildformates entlang der Flugrichtung im traditionellen Fall bei 60 % Vorwärtsüberlappung aus 72 Bildern, im Digitalfall aus 108 Bildern. Auf das Thema der Beliebbarkeit der Vorwärts-Überlappungen wird in einem gesonderten Abschnitt eingegangen.

3.3 Zum Datenfluss

Die Speicher- und Rechereinheit SCU kann die Bilder verarbeiten. In der SCU befinden sich 15 CPUs und 28 Platten. Abb. 8 zeigt schematisch die Optionen für die Bildverarbeitung. Es bestehen im Datenfluss



Abb. 6: Das UltraCam-D System mit Sensor SU, Speicher und Computereinheit SCU und der Konsole für die Steuerung.

einige unterschiedliche „Level“ bei den Bildprodukten, nämlich:

Level 00 14-bit Rohdaten mit Doppelspeicherung zur Datensicherheit,

Level 0 14-bit Rohdaten, verifiziert, keine Doppelabspeicherung notwendig,

Level 1 radiometrisch korrigiert und für schnellere Bearbeitung umsortiert,

Level 2 geometrisch korrigiert und zusammengefügt, Farbe gesondert gespeichert und

Level 3 Farbe ist in das Großformat interpoliert, das Farbbild-Endergebnis besteht.

Schon während des Fluges kann die Verarbeitung der Rohdaten in die höherwertigen Levels beginnen, nach der Landung kann die Berechnung an Bord des Bildflugzeuges fortgesetzt werden. Es kann aber auch die SCU aus dem Flugzeug genommen und die weitere Verarbeitung im Büro fortgesetzt werden.

Tab. 2: Einige wesentliche Spezifikationen der UltraCam-D. Das System ist mit einer Stromversorgung von 850 Watt zu versehen.

Sensor Einheit SU

| | |
|--|---|
| Panchromatisches Bildformat | 11500 *7500 Pixel @ 9 µm, 103,5 mm *67,5 mm |
| Objektivbrennweite und Apertur | 100 mm, f 1/5,6 |
| Gesichtsfeld in Flugrichtung und quer dazu | 55°/37° |
| Multi-Spektral (RGB, NIR) | 4,008 *2,672 Pixel, @ 9 µm |
| Verschluss in Sekunden | 1/500 – 1/60 |
| Bewegungskompensation mittels FMC | TDI Steuerung |
| Bildwiederholrate | bis zu 1,3 Bilder pro Sekunde |
| Radiometrische Auflösung | > 12 bit |
| Dimensionen | 45 cm *45 cm *60 cm |
| Gewicht | < 30 kg |

Speicher und Rechereinheit (Storage & Computing, SCU)

| | |
|---|---------------------|
| Speichervolumen | > 1 TB |
| Unkomprimierte Bilder, mit Doppelaufzeichnung für Datensicherheit | > 2775 Bilder |
| Dimensionen | 55 cm *40 cm *65 cm |
| Gewicht | < 35 kg |



Abb. 7: Ansicht der Sensoreinheit von unten. Im Sensor befinden sich 8 Objektive, davon dienen 4 für die panchromatische Aufnahme, 4 für die Aufnahme der 4 Farbkkanäle rot, grün, blau und infrarot. Jedes Objektiv hat dasselbe Gesichtsfeld. In der Bildebene sind die Flächenarrays angebracht. Der panchromatische Konus mit 4 CCDs dient als „Masterkonus“ zur Festlegung des Bildkoordinatensystems.

4 Verwaltung und Archivierung digitaler Luftbilder

Die 100 Jahre „Film in der Photogrammetrie“ führen beim Übergang auf rein digitale Daten sicherlich zu „Entzugserscheinungen“ der Anwender. Das Fehlen der analogen Bilddaten nach einer erfolgreichen digitalen Aufnahme wird von manchen als Nachteil bezeichnet. Nicht selten werden als Argumente für den Film Datensicherheit und einfachere Handhabung angeführt. Diese Haltung wird wohl im Hinblick auf den bargeldlosen Zahlungsverkehr, die durchwegs digitale Fernerkundung, die papierlose GIS-Welt und viele andere digitale Realitäten als konservativer Anachronismus gesehen werden müssen. Interessanterweise findet man heute in Photogrammetrie-Betrieben eine hybride Mischung aus Filmverarbeitung und digitalen Verfahren. Analytische Auswertegeräte sind verbreitet im Einsatz, die Digitalverfahren sind weitgehend auf die Orthophotoherstellung beschränkt. Das Bildspeicherformat ist nach

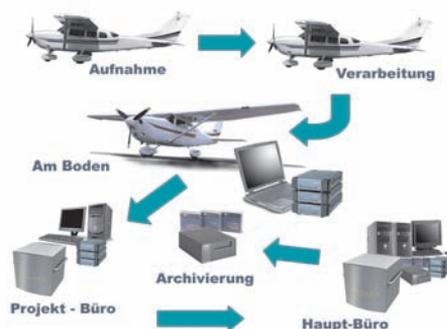


Abb. 8: UltraCam – Datenflusskonzept. Die im Flug erzeugten Bilddaten werden redundant gespeichert. Die Nachbearbeitung erfolgt je nach den örtlichen Voraussetzungen im Flugzeug, im Hangar oder im Büro. Der physikalische Transfer der Bilddaten kann in jeder Phase der Bildnachbearbeitung erfolgen.

wie vor auf Film beschränkt. Digitale Daten werden oft nur als Zwischenergebnis gesehen und daher nach der Verwendung nur halbherzig konserviert.

Die Digitalkamera ermöglicht das Bekennnis zum völlig digitalen Daten- und Arbeitsfluss. Es gilt hier also, den Anwender durch geeignete Werkzeuge zu unterstützen. In Analogie zur Satelliten-Fernerkundung ist eine geographisch orientierte Bilddatenbank bereitzustellen.

Im Laufe eines Jahres nehmen größere Photogrammetrie-Unternehmen ca. 20 000 Luftbilder pro Aufnahmesystem auf. Diese 20 000 Bilder belegen einen Speicheraufwand von 8 TeraBytes, wenn ein Einzelbild 400 Mbytes umfasst. Das sind nunmehr keine abschreckenden Datenmengen mehr. Wenn aber 20 000 Bilder pro Jahr zu verwalten, wieder zu finden, in Stereopaaren oder Bildverbänden gegliedert werden müssen, dann ist dies nur mittels einer Bilddatenbank sinnvoll möglich. Dazu entwickeln wir auf Basis der Satelliten-Bilddatenbank „EarthFinder“ das System „Earth Finder-Aerial“. Diese Datenbank enthält die Flugplanung jeder Befliegung, die Metadaten zu jedem Bildflug, zu jedem Bildverband und Bild. Sie enthält jedes Bild sowohl in voller geometrischer Auflösung als auch als Quick-view zur schnellen visuellen Prüfung. Und

sie beinhaltet eine Indexmap jedes Bildverbandes aus zusammengeführten Quickviews zur Übersicht über jeden Bildblock.

Bilddatenbanken müssen mit den heute bestehenden Datenbanken korrespondieren. Diese gibt es meist nur für Metadaten. Weiter sind sie so anzulegen, dass die Datenrechte des Bildeigentümers geschützt bleiben, und es ist selbstverständlich ein Internetzugang vorzusehen. Änderungen im Bestand sind rechtlich und administrativ gesichert zu organisieren. Die Eintragung von Daten ist getrennt von der Nutzung des Datenbestandes zu sehen.

5 Möglichkeiten der Redundanznutzung als Paradigmenwechsel

Wir treten in die spekulative Betrachtung eines Paradigmenwandels in der Photogrammetrie ein. Noch gibt es dazu keine gesicherten Untersuchungen, weil es ja bisher keine Digitalkameras gab, welche diese Ansätze realistisch erscheinen lassen. Das ändert sich aber. Im Folgenden versuchen wir, die Erwartung eines Paradigmenwandels zu begründen, sodass daraus für Entwicklungen in photogrammetrischer Software Anregungen und Denkanstöße entstehen.

5.1 Bisher: Minimierung der Bildanzahl

Die Photogrammetrie entstand, um die bis dahin ausschließlich terrestrische Vermessung günstiger zu erledigen und Kosten zu sparen. So hatte sie von Anbeginn das Ziel, mit einer Minimalzahl an Luftbildern auszukommen, um ein gegebenes Genauigkeitsziel zu erreichen. Alle Handhabungen waren selbstverständlich manuell, der Projektaufwand war eine oft lineare Funktion der Zahl der betroffenen Luftbilder, zum Teil auch eine Funktion der Fläche des zu vermessenden Gebietes. Es ist daher nicht verwunderlich, dass auch heute das Ziel besteht, die Zahl der Luftbilder für ein Projekt zu minimieren.

Analoge Luftbilder wurden seit jeher in einem standardisierten Muster an Fluglinien und in einem kaum veränderten Raster

aufgenommen. Neben dem Bildmaßstab, der von der Projektanforderung abhängt, sind Längsüberdeckung mit 60 % und Quersüberdeckung mit 20 % die tonangebenden Parameter, die als nahezu unveränderliche Kenngrößen in der photogrammetrischen Luftbildaufnahme ihren festen Platz einnehmen. Grund dafür ist das Ziel, mit der minimalen Bildanzahl die Kosten für Film, Entwicklung, Handhabung, Abtastung und Auswertung für eine vorgegebene Projektfläche niedrig zu halten.

5.2 Von nun an: Optimierung des Projektergebnisses bei freier Bildzahl

Die digitale Luftbildaufnahme kennt keine Kosten für Film, Entwicklung, Handhabung und Abtastung. Damit verfallen tradierte Planungsmuster. Das Paradigma der minimalen Bildanzahl kann durch ein neues Paradigma ersetzt werden, in welchem die Bildanzahl kein Faktor mehr ist. Stattdessen können neue Faktoren eines Photogrammetrie-Projektes in den Vordergrund rücken, etwa:

- die Minimierung des manuellen Beitrages,
- die Optimierung des manuellen Auswerte-Beitrages,
- die Maximierung der Robustheit und Sicherheit des Ergebnisses,
- die Maximierung der geometrischen Genauigkeit

Bildfolgen mit 80 %, 90 %, 95 % oder mehr Längsüberdeckung sind möglich, ohne wesentliche Zusatzkosten zu verursachen, vorausgesetzt, dass die Verarbeitungskette weitgehend automatisiert abläuft. Es ist einfach zu sehen, dass im Digitalfall eine Flächenkamera ähnlich wie eine Zeilenkamera betrieben werden kann, sodass Bilder in hoher Frequenz neu aufgenommen werden. Das Ergebnis wäre einer Zeilenkamera nicht gänzlich unähnlich, welche mit vielen Einzelzeilen in der Bildebene ausgestattet wird und damit eine hohe Redundanz erzielt, wobei aber der Geometrievorteil bei der Flächenkamera liegt.

5.3 Hochredundante Aerotriangulation

Welche Faktoren haben bisher die breite Akzeptanz der vollautomatischen Aerotriangulation behindert? Es ist wohl die Sorge über die Notwendigkeit manueller Eingriffe, welche den Vorteil der Automatisierung zunichte machen kann.

Sollte eine Längsüberlappung von 90 % erzielt werden, so liegt jeder Geländepunkt auf 10 einander recht ähnlichen Bildern. Bei 95 % steigert sich dies auf 20 Bilder. Solche benachbarte Bilder würden wegen des geringen geometrischen Unterschiedes sehr hohe Korrelationswerte bei der Bildüberlagerung und daher sehr hohe Sicherheit liefern. Analog den Verfahren der Auswertung von hochredundanten Bildstreifen aus Videokameras, etwa durch POLLEFEYS (2002), können sehr viele Verknüpfungspunkte vollautomatisch ermittelt und in die Blockausgleichung eingebracht werden. Streifen sehr hoher geometrischer Robustheit und Steifheit werden möglich, wie dies in Film-basierten Verfahren nicht denkbar ist. Dies wiederum kann sich auf die Art auswirken, in welcher Verfahren der Direktmessung der Elemente der äußeren Orientierung eingesetzt werden. Die Genauigkeit ist vermutlich durch die Faktoren „Zahl der Verknüpfungspunkte“, „Zahl der beteiligten Bilder“ und „Geometrie der äußeren Orientierung“ bestimmt.

Es ist zu erwarten, dass die gemeinsame Ausgleichung von hochredundanten Bildkoordinatenmessungen und direkt gemessenen Orientierungsparametern neben dem Vorteil der Automatisierung auch einen deutlichen Qualitätsgewinn mit sich bringen wird.

Notwendig wird sein, dass heutige Programmsysteme zur automatischen Messung von Bildpunkten in Bildverbänden und die entsprechenden Blockausgleichungssysteme mit den hoch überlappenden Bildverbänden keine Schwierigkeiten haben.

5.4 Hochredundante DEM-Erstellung

Laserscanner beweisen den Wert eines digitalen Höhenmodells (DEM), welches ohne wesentliche manuelle Arbeiten erzeugt werden kann. In Verbindung mit der Direktmessung der äußeren Orientierung der Trägerplattform ergibt sich eine nahezu vollautomatische DEM-Erstellung. Benachbarte Aufnahmestreifen müssen wohl aneinander angepasst werden, aber im Vergleich zur herkömmlichen manuellen Photogrammetrie mit der Bearbeitung vieler Filmbilder scheint ein Laserscanner ein hoch automatisches System zu sein.

Wie wird sich dies im Hinblick auf Digitalkameras und Redundanznutzung ändern? Es ist anzunehmen, dass die hohe Längsüberdeckung mit 90 % oder mehr und daher mit 10 bis 20 Bildern pro Objektpunkt ein wesentlich besseres Höhenmodell verspricht als dies bisher mit nur 2 Bildern möglich war. Und es gilt nicht mehr wie bisher, mit einer großen Zahl von Luftbildern die Orientierungsparameter durch Triangulierung zu berechnen und dann kaum überbestimmte Stereoermittlungen durchzuführen.

Stattdessen folgt auf die vollautomatische hochredundante Aerotriangulation die DEM-Bildkorrelation mit wesentlich robusteren Korrelationswerten. Denn es sind die Perspektivunterschiede benachbarter Bilder weit geringer als bisher, daher treten Korrelationsversager und Falschkorrelationen weit weniger oft auf, Sicht-tote Räume reduzieren sich auf jene, die es auch im Laserscanning gibt und durch die Verwendung von mehr als 2 Projektionsstrahlen im Sinne des „Multi-Ray-Matching“ resultiert ein sehr robustes und genaues Höhenmodell aus voll automatischen Verfahren. Manuelle Korrekturen sind kaum noch zu erwarten. Um diese DEMs in der Tat zu erzeugen, ist sicherzustellen, dass DEMs mit Verfahren des Multiray-Matching realisierbar sind.

Wird dies die Rolle des Laser-Scanners in der topographischen Vermessung beeinträchtigen können?

5.5 Hochredundante Gebäude- erfassung

Der Übergang vom 2D GIS zum 3D Stadtmodell im Sinne der Cybercities (BALTSAVIAS et al. 2000) wird heftig überlegt. Es gibt dazu kein technisches Hindernis, denn 3D Objektrekonstruktionen sind seit 100 Jahren das Tagesgeschäft der Photogrammetrie. Wohl scheitert die flächenmäßige Realisierung von städtischen 3D GIS an den Kosten der manuellen Arbeit. Die automatische Erfassung der Dachlandschaften, der Vegetationsbestände getrennt von den Gebäuden, des DEMs der kahlen Erde ist notwendig. Dazu sind Verfahren zu realisieren, die nicht an der mangelnden Überbestimmung durch die klassische Bildminimierung scheitern müssen.

Erfolgreiche Systeme zur Erstellung von Gebäudemodellen klassifizieren die Vegetation und trennen sie von den anderen vertikalen Objekten der Erdoberfläche. Dazu sind Verdeckungen und Sicht-tote Räume so gering wie möglich zu halten. Weiter sind Dachformen durch Analyse des rohen DEM und der Bildsegmente zu erfassen. Das verspricht eine gewichtige Verbesserung durch die simultane Erfassung von Farb- und Falschfarbbildern, als auch durch hohe Längsüberdeckungen aus einer Digitalkamera.

Entsprechende Softwaresysteme mögen heute noch nicht bestehen. Sie sind in Verbindung mit einer digitalen Luftbildkamera aber sehr sinnvoll.

5.6 Manuelle Bildbearbeitung hoch redundanter Bildstapel

Die Digitalbilder haben 12 Bit per Farbkanal mit bis zu 4000 Grauwerten. Die manuelle Bearbeitung muss auf herkömmlichen Monitoren erfolgen, die meist nicht mehr als 200 unterschiedliche Grauwerte darstellen können (< 8 Bit). Es gilt, erstens aus 12-Bit-Bildern zur visuellen Darstellung 8-Bit-Bilder zu erzeugen, und es sind aus den hochredundanten Bildstapeln für die Betrachtung mit nur 2 Augen Paare auszuwählen.

Die erste Aufgabe kann durch eine so genannte „Rekonstruktion“ gelöst werden. Es wird aus einem gegebenen 12-Bit-Digitalbild mit $11\,500 \times 7\,500$ Pixeln ein neues 8-Bit-Bild erzeugt, welches aber $23\,000 \times 15\,000$ Pixel beinhaltet. Die Verdoppelung der Anzahl Pixel für die visuelle Darstellung entspricht der Erfahrung mit dem Unterschied zwischen gescannten 8-Bit-Filmbildern und digital erfassten 12-Bit-Bildern.

Die zweite Aufgabe muss aus dem Bildstreifen mit vielen Bildern jedes Geländepunktes jene zwei auswählen, welche einen Geländepunkt optimal erfassen. Das sind die außen liegenden Bildpaare, welche einer Längsüberdeckung mit 60% entsprechen. Sollte man manuell gewisse Punkte und Objekte markieren, so wären diese Markierungen in den vollen Bildstapel einzubringen, um die 3D Koordinaten mit einem automatischen Multi-Ray-Matching unter Nutzung aller dazwischen liegenden Bilder festzulegen. Es ist anzunehmen, dass die manuelle Messung immer durch diese Mehrstrahlenbeobachtung ersetzt werden wird.

Geeignete Rekonstruktionsverfahren zur optimalen Darstellung von 12 (in Farbe 36-) Bit Bildern auf einem Stereobildschirm mit nur 8 Bit pro Farbkanal sind bereitzustellen. Die Erweiterung der manuellen Messung im Stereobildpaar um die „unsichtbaren“ dazwischen liegenden und redundanten Bilder ist softwaremäßig zu realisieren.

6 Schlussfolgerungen

Wir haben durch den Vergleich von analogen und digitalen Luftbilddaten angedeutet, dass eine Digitalkamera mit $11\,500 \times 7\,500$ Pixeln einer herkömmlichen Filmkamera überlegen ist. Es wurde auch gezeigt, dass die Vorteile der digitalen Aufnahmetechnologie dem Überleben des Luftbildfilmes enge Grenzen setzen. Zunächst ist zu erwarten, dass wirtschaftliche Vorteile durch die Einsparung von Verbrauchsmaterial und das Wegfallen des Aufwands für die Digitalisierung der analogen Bilder als Killer-Argument den Übergang zur Digitalsensorik begründen können. Denn mit nur 20 000 neuen Luftbildern ist eine Digitalkamera

des Typs UltraCamD gänzlich, inklusive der Betriebskosten und Wartung, zu finanzieren.

Die radiometrischen und geometrischen Vorteile und auch die Überlegungen zum Datenfluss sind gern gesehene zusätzliche Argumente, die sich auch im Wesentlichen auf die Wirtschaftlichkeit auswirken. Aber es gibt noch eine sehr interessante und weiterführende Überlegung, jene des Paradigmenwechsels.

Ein noch ungenutzter und nicht diskutierter Vorteil der digitalen Luftbildaufnahme liegt im Automatisierungs-Potential, das durch geänderte Befelegungsparameter und eine damit verbundene neue Aufnahmestrategie ausgeschöpft werden kann. Es geht um die einfache Möglichkeit, jeden Geländepunkt auf mehr als den herkömmlichen 2 Bildern aufzunehmen. Ohne Kosten sind 10, 20 und mehr Bilder pro Geländepunkt erfassbar. Dies resultiert aus der Möglichkeit, sehr hohe Längsüberlappungen vorzusehen, denn die vorgestellte Filmkamera kann Bilder im Takt von nur 0,75 Sekunden erzeugen. Damit sollte es möglich werden, eine vollautomatische Aerotriangulation ohne weitere manuelle Eingriffe zu rechnen, DEMs hoher Genauigkeit auch ohne wesentliche manuelle Eingriffe zu erfassen und auch andere Aufgaben der automatischen Bildanalyse in robuster Weise zu lösen.

Literatur

- BALSAVIAS, M., GRÜN, A. & VAN GOOL, L. (eds.), 2001: Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images (III). – 415 p., A.A. Balkema Publishers, Lisse, The Netherlands.
- CHEN, T., CATRYSSSE, P., GAMAL, A. & WANDELL, B., 2000: How Small Should Pixel Size Be? – Information Systems Lab., Stanford University. www-isl.stanford.edu/~abbas/group/papers_and_pub/pixelsize.pdf.
- LEBERL, F., GRUBER, M., PONTICELLI, M., BERN-OEGGER, S. & PERKO, R., 2003: The UltraCam Large Format Aerial Digital Camera System. – Proceedings of the ASPRS Annual Convention, Anchorage USA (CD only).
- LEBERL, F., PERKO, R., GRUBER, M. & PONTICELLI, M., 2002: Novel Concepts for Aerial Digital Cameras. – Proceedings of the ISPRS Commission I Symposium, Denver, USA. ISPRS Archives, Volume 34, Part 1. Available from GITC bv, Lemmer The Netherlands (CD only).
- LEBERL, F. & GRUBER, M., 2002: Color in Photogrammetric Remote Sensing. – ISPRS Commission VII Symposium in Hyderabad, India. Archives of the ISPRS, Vol. XXXIV, Part 7: 59–64, available from GITC bv, Lemmer, The Netherlands.
- PERKO, R. & GRUBER, M., 2002: Comparison of Quality and Information Content of Digital and Film Images. – ISPRS Commission III Symposium in Graz, Austria. Archives of the ISPRS, Vol. XXXIV, Part 3B: B206–B209, available from GITC bv, Lemmer, The Netherlands.
- POLLEFEYS, M., VAN GOOL, L., VERGAUWEN, M., CORNELIS, K., VERBIEST, F. & TOPS, J., 2002: Video-to-3D. – ISPRS Commission III Symposium in Graz, Austria. Archives of the ISPRS, Vol. XXXIV, Part 3A: A252–A257, available from GITC bv, Lemmer, The Netherlands.

Anschriften der Autoren:

MICHAEL GRUBER
Vexcel Imaging GmbH
Münzgrabenstraße 11, A-8010 Graz
Tel.: +43-316-84 90 66 0
e-mail: mgruber@vexcel.co.at

FRANZ LEBERL
Vexcel Imaging GmbH
Münzgrabenstraße 11, A-8010 Graz
Tel.: +43-316-84 90 66 0
e-mail: mgruber@vexcel.co.at oder:
Institut für Maschinelles Sehen und Darstellen,
Technische Universität Graz
A-8010 Graz, Tel.: +43-316-873-5011
e-mail: leberl@icg.tu-graz.ac.at

ROLAND PERKO
Institut für Maschinelles Sehen und Darstellen,
Technische Universität Graz
A-8010 Graz, Tel.: +43-316-873-5011
e-mail: leberl@icg.tu-graz.ac.at

Manuskript eingereicht: April 2003
Angenommen: Mai 2003

Vom Sonnenkompass zum CCNS4 – 80 Jahre Navigation von Bildflügen bei der Hansa Luftbild

PETER HERMS, Münster

Keywords: aerial photography, history of aerial survey navigation, Doppler Radar, CCNS

Summary: *The long Way from Solar Compass to CCNS4 – 80 Years of Survey Flight Navigation at Hansa Luftbild.* A description of methods for navigation of aerial survey flights as executed by *Hansa Luftbild* flight crews starting in the early twenties of the last century until today.

Zusammenfassung: Eine Beschreibung von Methoden der *Hansa Luftbild* Flugbesatzungen zur Navigation von Bild- und anderen Messflügen von den frühen zwanziger Jahren bis heute.

1 Sichtnavigation

80 Jahre *Hansa Luftbild* – das bedeutet 80 Jahre Navigation für Bildflüge.

Darüber, wie die Bildflüge in den Anfangsjahren navigiert wurden, gibt es kaum Berichte von Zeitzeugen. Im Wesentlichen dürften diese Flüge nach Sichtnavigation durchgeführt worden sein. Das heißt, der Navigator hat das überflogene Gelände mit einer detailreichen Karte verglichen und danach den Piloten eingewiesen. Optische Hilfsmittel wie Navigationsteleskope gab es nicht, und wir dürfen annehmen, dass man sich mit Konstruktionen aus Drähten oder Blechstreifen im Rumpfboden des Flugzeuges behalf, um den Nadirpunkt abzuschätzen und die Abtrift zu bestimmen. Wenn man sich hierzu noch die Flugeigenschaften der in den zwanziger und Anfang der dreißiger Jahre eingesetzten Flugzeuge vorstellt – Kursanzeige durch einfachste Magnetkompass –, lässt sich leicht ermesen, dass die Bildfliegerei damals alles andere als eine präzise Angelegenheit war.

Sicherlich haben die Flugbesatzungen bereits damals von etwas geträumt – wie es beinahe fünfzig Jahre später ALBRECHT GRIMM bei der Gründung von IGI formulierte – ein Bildflugzeug „wie auf Schienen“

metergenau mit exakt ermittelter Abtrift über die aufzunehmenden Flugstreifen zu führen. Doch bis dahin war es noch ein langer Weg.

2 Antarktisbefliegung

Die bis dahin mit Sicherheit großartigste Leistung auf dem Gebiet der Navigation von Bildflügen war die Durchführung der Antarktisbefliegung durch die Abteilung *Hansa Luftbild* der *Lufthansa* im Jahre 1939.

Das Flugzeugmutterschiff *Neuschwabenland* mit den beiden für Bildflüge umgerüsteten Flugbooten des Typs Dornier Wal „*Boreas*“ und „*Passat*“ erreichte die Antarktis am 19. 01. 1939 bei 4 Grad 15 Min W und 69 Grad 10 Min Süd.

In den folgenden Wochen wurden fast 600 000 km² (!) Fläche mit ZEISS Reihemesskammern in Form von Schrägaufnahmen fotografiert.

Die Navigation und Ortung erfolgte ausschließlich durch Koppelnavigation, gestützt durch Funkpeilung von Bord des Mutterschiffs.

Der Wind in Richtung und Stärke wurde durch das Personal der *Schwabenland* gemessen und an die Flugboote gefunkt. Die Windinformation wurde in gewissen Ab-

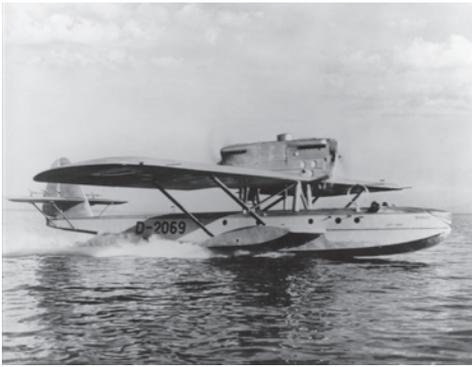


Abb. 1: „Bildflugzeug“ DORNIER WAL.



Abb. 2: Sichtnavigation mit Teleskop.

ständen durch Abwurf von Rauchbomben verifiziert resp. korrigiert. Einen erheblichen Anteil an der Bestimmung der für die Koppelnavigation so wichtigen Windkomponente hatte der Bordfunker, der durch Bedienung des Peilrahmens fortlaufend Standlinien zu dem auf bekannter Position liegendem Mutterschiff lieferte. Aus den Informationen über Fluggeschwindigkeit, Wind und aktuellem Kompasskurs errechnete der Navigator Position, Sollkurs und – last not least – die Zeiten für das Intervallometer zum richtigen Auslösen der Messkammern.

Anstelle des in Polarnähe ohnehin unbrauchbaren Magnetkompasses wurde ein durch den Copiloten nachgeführter Sonnenkompass eingesetzt, der eine auf 1 Winkelgrad genaue Kurssteuerung ermöglichte.

Die unter den geschilderten Umständen doch recht komplizierte Koppelnavigation war nicht nur für die Führung der Flugzeuge erforderlich, sondern diente gleichzeitig der Positionierung aller (11 000 !) Luftbilder für die spätere Kartierung, immerhin mit einer Genauigkeit im Bereich von 10 Kilometern.

3 Die Situation nach dem 2. Weltkrieg

Nach dem zweiten Weltkrieg nahm *Hansa Luftbild* die Bildfliegerei zunächst mit ausländischen Luftfahrzeugen, 1955 nach Gewährung der Lufthoheit durch die Alliierten mit eigenen Flugzeugen wieder auf.

Die Navigation der Bildflüge erfolgte wie in der Zeit vor dem Kriege nach Sichtnavigation. Neu war der Einsatz von Drift – resp. Bombsights – optischen Geräten entwickelt zum zielgenauen Abwurf von Fliegerbomben. Die aus den Beständen der Luftwaffen erworbenen Geräte ermöglichten dem Navigator aus einer bequemen Sitzposition Senkrechtsicht nach unten und eine brauchbare Bestimmung der Abtrift.

Diese Navigationsteleskope – in den 60er und 70er Jahren durch die bekannten Hersteller von Messkammern wesentlich verbessert – verbunden mit gutem Kartenmaterial (in der Regel die TK 25 oder die TK 50) waren bis in die neunziger Jahre des vergangenen Jahrhunderts die Standardausrüstung für die Durchführung von Messflügen.

Diese spezielle Sichtnavigation für Messflüge waren von einem abhängig: der Verfügbarkeit entsprechend geschulter und geübter Bildflugnavigatoren. Die erforderliche Ausbildung dieser Spezialisten bis zur Perfektion war langwierig und in Anbetracht des benötigten Flugaufwandes recht kostspielig.

4 Erprobung elektronischer Systeme

So ist es erstaunlich, dass der rasante Fortschritt bei der Entwicklung elektronischer Navigationshilfen für die Militär- und Ver-

kehrsfliederei in der Messbildfliegerei bis zur Verfügbarkeit des GPS kaum Niederschlag fand. Gemessen an den damals sehr hohen Kosten für derartige Systeme war ihr Einsatz aber ganz einfach zu wenig effektiv. Bei der *Hansa Luftbild* wurde in den 70er Jahren u. a. ein DECCA Navigationssystem erprobt, ein Hyperbelsystem, bei dem der zu fliegende (gerade) Flugstreifen – zu dieser Zeit mangels geeignetem Rechner – dem Piloten auf seiner Anzeige tatsächlich als Hyperbel präsentiert wurde.

Systeme, deren Einsatz für die Bildflugnavigation für kleine Maßstäbe durchaus recht erfolgreich war, VLF Omega und LORAN, kamen kaum noch zum Einsatz, weil anschließend das weit überlegene GPS verfügbar wurde.

5 Doppler Radar

Seit Mitte der 60er Jahre gab es bei der *Hansa Luftbild* ein elektronisches Navigationssystem, das sich über viele tausend Flugstunden bestens bewährt hat.

Im Rahmen einer Kooperation mit der Firma *PRAKLA-SEISMOS* führte die *Hansa Luftbild* weltweit Messflüge für geophysikalische Exploration durch.

Navigiert wurde mit Doppler Radar. Bei diesem ursprünglichen für militärische Zwecke entwickeltem System macht man sich den Dopplereffekt zunutze. Hierbei werden Radarimpulse in und quer zur Flugrichtung emittiert; beim Empfang der vom überflogenen Gelände reflektierten Signale stellt man Frequenzänderungen fest, die gemäß dem Dopplerprinzip ein Maß für die Geschwindigkeit des Luftfahrzeuges über Grund sowie für die Abtrift ergeben.

Entsprechend dem damaligen Stand der Technik wurde mit Hilfe eines mechanischen (!) Rechners hiermit die Position des Flugzeuges, bezogen auf einen bekannten Ablaufpunkt, errechnet.

Diese Dopplernavigation ist ein Flugzeug autarkes System und arbeitet also völlig unabhängig von jedweden Bodenstationen. Dies war nicht nur aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten eine ideale Lösung, sondern

ermöglichte in unzugänglichen Gebieten überhaupt erst den Messflugeinsatz.

Nachteil war jedoch die Einschränkung im Hinblick auf die erreichbare Genauigkeit. Die Positionsgenauigkeit war zeitabhängig und betrug 0,5 % der zurückgelegten Flugstrecke. Bei einem Flugstreifen, der 50 km lang ist, ergab sich also ein Ortungsfehler von 250 Metern.

6 Hilfsmittel Sicht/Koppelnavigation

Das Doppler-Verfahren hatte sich für Befliegungen von Blöcken eingeschränkter Größe bestens bewährt. Für großflächige Luftbildbefliegungen, zumal aus großer Höhe, war es jedoch wenig geeignet.

Die Befliegung weiträumiger Gebiete, für die es im außereuropäischen Ausland häufig keine geeigneten Navigationskarten gab, wurde so bis zum Ende der achtziger Jahre mit Hilfe einer Kombination aus Sicht- und Koppelnavigation realisiert

Der Autor erinnert sich an einen Auftrag, bei dem eine Fläche von den Ausmaßen Bayerns in der Südsahara aufzunehmen war. Die Übersichtskarte, die der freundlich lächelnde Repräsentant des Auftraggebers an die Flugbesatzung übergab, bestand aus einem Blatt weißen Papiers mit den Begrenzungskordinaten.

Als Hilfsmittel standen der Autopilot, ein Kurskreiselssystem, die Borduhr und ein gut justiertes Navigationsteleskop des Typs ZEISS *NT1* zur Verfügung. In das Gesichtsfeld dieses *NT1* war eine Strichplatte mit einer Markierung für die Lage des Nachbarstreifens eingespiegelt.

Von einem der Eckpunkte des Gebietes wurde nun unter Berücksichtigung der sorgfältig erflogenen Windkomponente der erste Flugstreifen ausschließlich nach Kompasskurs und Uhr geflogen. Auf diesem Streifen fertigte der Navigator mit Hilfe der Markierung „Nachbarstreifen“ eine Skizze des nächsten zu befliegenden Streifens an.

Nach der Kehrtkurve wurde der nächste Flugstreifen nach eben dieser Skizze navigiert und auf diesem Streifen Nr. 2 die Skizze für den Streifen Nr. 3 angefertigt usw.

7 Auf Schienen durch die Luft

Ein erster Ansatz in diese Richtung ergab sich, als Anfang der achtziger Jahre einer unserer Kollegen von einer Demonstrationsveranstaltung einer Firma IGI aus Siegen zurückkehrte und begeistert von eben diesen *Schienen* berichtete, die nicht nur das Flugzeug „unheimlich genau“ über die geplanten Streifen führten, sondern deren *Schwellen* darüber hinaus die Kamera immer an der richtigen Stelle auslösten – also perfekte Zielaufnahmen machten.

So interessant das so vorgestellte *CCNS* war, so hatte es doch zu diesem Zeitpunkt einen gravierenden Nachteil: das dazugehörige Streckenmesssystem *TRIDENT* erforderte den Betrieb mehrerer Sender am Boden, die stationiert und während der Messflüge überwacht werden mussten.

Die nächste Stufe des *CCNS* benutzte als Navigationskomponente die durch die Flugsicherung betriebenen DME- (Entfernungsmess-) und TACAN-Stationen.

Damit war bereits der Einsatz des *CCNS* für nahezu die gesamte Bundesrepublik ohne den kostenaufwändigen Betrieb eigener Bodenstationen möglich geworden.

Der erfolgreiche Einsatz eines ersten – aus heutiger Sicht – primitiven GPS-Empfängers während einer Bildflugmission in Thailand regte zu der Idee an, das weltweit verfügbare GPS mit dem ja bereits verfügbaren und erprobt gut funktionierenden Flugführungs- und Managementsystem – dem *CCNS* – zu kombinieren. Im Hause IGI waren bereits ähnliche Überlegungen angestellt worden. Jedoch war man zu diesem Zeitpunkt überhaupt nicht sicher, ob der für zivile Anwendungen freigegebene C/A Code des GPS eine für Zwecke der Navigation von Messflügen ausreichende Positionierungsgenauigkeit ermöglichte.

So war die Beschaffung eines ersten *CCNS* auf Basis der GPS Navigation im Hause *Hansa Luftbild* zunächst durchaus umstritten.

Zur Überraschung aller Beteiligten war die Genauigkeit des GPS auch im *non differential mode* wesentlich besser als erwartet und das *CCNS4* übertraf von Anbeginn alle gesetzten Erwartungen.

Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit dieses Systems waren auf Anhieb so überzeugend, dass kurzfristig Systeme für die gesamte aus 5 Flugzeugen bestehende Flotte beschafft wurden.

8 Ergebnis

Der Traum von der Flugführung *wie auf Schienen* ist erfüllt. Nach 10 Jahren operationellem Einsatz und nahezu 10000 Flugstunden mit dem *CCNS* ist der Einsatz dieses Systems so selbstverständlich geworden, dass für die inzwischen nachgerückten jungen Flugbesatzungen die Erzählungen von Drahtkonstruktionen, vom Sonnenkompass, von Sicht- oder Koppelnavigation, ja selbst vom Flug mit dem Navigationsteleskop, Historie aus einer vergangenen Zeit sind.

Literatur

- HANSA LUFTBILD, 1939: Kartierung Neuschwabenland. – Luftbild u. Luftbildmes. **16**: 1–48.
BOIE, D., 1970: Untersuchungen zur Doppler-Navigation und -Ortung von geophysikalischen und photogrammetrischen Messflügen. – Wiss. Arb. Univ. Hannover, Nr. 39.

Anschrift des Autors:

PETER HERMS

Hansa Luftbild Sensorik und Photogrammetrie GmbH, Elbestr. 5, D-48145 Münster

Tel: 49-251-2330-190, Fax: 49-251-2330-112

e-mail: herms@hansaluftbild.de

Manuskript eingereicht: April 2003

Angenommen: Mai 2003



Abb. 3: Kontroll- und Anzeigeelement des *CCNS4*, integriert im Instrumentenbrett eines Vermessungsflugzeuges von Hansa Luftbild.

Airborne Laserscanning und direkte Sensororientierung

CHRISTOPH HUG, Poing

Keywords: aerial photogrammetry, airborne laserscanning, sensor orientation, GPS, IMU, IGI-AEROcontrol

Summary: *Airborne Laserscanning and Direct Sensororientation.* Airborne laserscanning as method for the three-dimensional survey of topography became operational only with the availability of accurate systems of direct sensor orientation based on dGPS and IMU. This paper discusses the relationship of airborne laserscanning and direct sensor orientation and analyses the requirements for sensor navigation systems arising from this application. It turns out that modern sensor navigation systems like the IGI AEROcontrol-IIId provide a level of accuracy that already exceeds the current requirements from airborne laserscanning.

Zusammenfassung: Airborne Laserscanning als Verfahren zur dreidimensionalen Topographieerfassung vom Flugzeug aus wurde erst durch hochgenaue Verfahren der direkten Sensororientierung mit dGPS und IMU operationell nutzbar. Dieser Artikel erläutert den Zusammenhang zwischen Airborne Laserscanning und direkter Sensororientierung und analysiert die Anforderungen, die sich aus dieser Anwendung an Sensor-Navigationssysteme ableiten. Es zeigt sich dabei, dass moderne Sensor-Navigationssysteme wie das IGI AEROcontrol-IIId eine Genauigkeit der direkten Sensororientierung bieten, die die aktuellen Anforderungen für Airborne Laserscanning deutlich überschreitet.

Einleitung

Airborne Laserscanning ist eine verhältnismäßig junge Methode, die Oberfläche und Topographie der Erde dreidimensional vom Flugzeug oder Hubschrauber aus zu erfassen. Als direktes, aktives, monoaxiales Messverfahren arbeitet es vielfach auch unter Bedingungen zuverlässig, bei denen andere Verfahren nicht oder nur eingeschränkt nutzbar sind. Airborne Laserscanning zeichnet sich durch eine weitgehend automatische, vollständig digitale Datenaufnahme und einen vollständig computerisierte Auswertung mit hohem Automatisierungsgrad aus. Dadurch erlaubt es eine sehr wirtschaftliche Aufnahme großer Flächen mit hoher Messpunktdichte und Genauigkeit.

Arbeitsweise

Die Aufnahme einer Oberfläche durch Airborne Laserscanning erfolgt durch punkt-

weise Entfernungsmessung und polares Anhängen – die Entfernung zwischen Sensor und Oberfläche wird durch Laufzeitmessung eines modulierten Laserstrahls bestimmt; die Orientierung des Messstrahls und seine Ursprungsposition werden gleichzeitig direkt und unabhängig von der Entfernungsmessung erfasst, um den angemessenen Oberflächenpunkt in ein festes räumliches Bezugssystem einzuordnen. Ein Airborne Laserscanning System besteht daher aus zwei Hauptkomponenten:

- dem Laserscanner, der die Entfernung zur Oberfläche misst und den Messstrahl quer zur Flugrichtung ablenkt, und
- einem Sensor-Navigationssystem zur direkten Sensororientierung, bestehend aus GPS-Empfänger zur Positions- und IMU (inertial measurement unit), zur Orientierungserfassung.

Im Unterschied zu photogrammetrischen und bildgebenden Verfahren arbeitet Laser-

scanning (bislang ausschließlich) durch sequenzielle Einzelpunktmessungen. Es besteht also keine zwingende innere geometrische Beziehung zwischen aufeinanderfolgenden Messungen, so wie sie bei den Pixeln eines Flächenbildes gegeben ist, aus der eine zumindest teilweise Rekonstruktion des Oberflächenverlaufs bzw. der Aufnahme-position allein anhand der Bilddaten möglich wäre. Daher ist Laserscanning auf eine unabhängige äußere Positions- und Orientierungserfassung angewiesen. Ähnlich wie bei Zeilenkameras sind für Laserscanning daher hohe Anforderungen an die Genauigkeit der direkten Sensor-Orientierung gestellt.

Geschichtlicher Überblick

Seit den frühen siebziger Jahren arbeiteten verschiedene Forschungseinrichtungen an der Erfassung der Erdoberfläche durch Laser-Entfernungsmessung vom Flugzeug aus. Entscheidendes Problem blieb dabei allerdings stets die Erfassung der genauen Sensorposition, was zwar für Forschungsprojekte lokal durch aufwendige Tracking-Systeme gelöst werden konnte, für einen flächenhaften oder kommerziellen Einsatz des Verfahrens allerdings ein zu großes wirtschaftliches und logistisches Hindernis darstellte. So beschränkten sich viele der frühen Untersuchungen auf Anwendungen, bei denen die absolute Sensorposition eine untergeordnete Rolle spielte, wie in der Laserbathymetrie (KRABILL & HOGE 1979) oder der Baumhöhenmessung (NELSON et al. 1984), bei denen die relevanten Informationen aus den Laufzeitdifferenzen zwischen verschiedenen Zielen innerhalb jeder Messung (z. B. Wasseroberfläche-Gewässergrund, Baumkronen-Boden) abgeleitet werden konnte.

Schließlich schuf jedoch der vollständige Ausbau des Navstar Global Positioning Systems (GPS) in den frühen 90er Jahren sowie Entwicklungen zu dessen Nutzung für die hochgenaue kinematische Positionserfassungen (Trägerphasenauswertung, dGPS) die Voraussetzungen für eine hochgenaue, absolute und effiziente Positionserfassung an (fast) beliebigen Punkten der

Welt (SÖHNE et al. 1993). Die Integration von kinematischem dGPS und inertialer Messtechnik zu kommerziellen Sensornavigationssystemen zur direkten Sensororientierung, wie z. B. dem IGI AEROControl-System, führte schließlich dazu, dass ein wirtschaftlicher Einsatz von direkter Sensor-Positionierung und -Orientierung und damit ein operationeller Einsatz von Airborne Laserscanning möglich wurde.

Der erste abbildende Laserscanner in Europa wurde 1993 vorgestellt (ScaLARS, HUG 1994) und nutzte in verschiedenen Projekten ab 1996 das IGI AEROControl System. Das erste kommerzielle Airborne Laserscannersystem (Optech ALTM) kam 1994 auf den Markt. Seither verzeichnet der Markt für Airborne Laserscanning-Systeme und -Dienstleistungen ein rapides Wachstum mit inzwischen über 80 Systemen weltweit im Einsatz (BALSAVIAS 1999, FLOOD 2003). Entscheidend für diesen Erfolg sind die mit dieser Technologie erreichbare hohe Genauigkeit und die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens.

Genauigkeit

Die Genauigkeit, mit der ein angemessener Oberflächenpunkt durch Airborne Laserscanning erfasst wird, wird beeinflusst durch

- die Entfernungsmessgenauigkeit und die Genauigkeit der Ablenkwinkelersfassung beim Laserscanner,
- die Genauigkeit der Positions- und Orientierungserfassung durch das Sensor-Navigationssystem (kinematisches dGPS, IMU).

Für Höhenfehler in Lasermessdaten sind primär Offsetfehler des Entfernungsmesssystems und Fehler aus der Höhenbestimmung durch GPS bestimmend. Lagefehler in Flugrichtung werden vor allem durch Zeitoffsetfehler zwischen Lasersystem und dem Sensornavigationssystem und Nickwinkelfehler verursacht. Lagefehler quer zur Flugrichtung ergeben sich überwiegend aus Fehlern in der Ablenkwinkel- und Rollwinkelersfassung. An den Spurrändern bewirken außerdem Ablenk- und Rollwinkelfehler

Höhenfehler, und Kurswinkelfehler wirken sich auf Lagefehler in Flugrichtung aus.

Laserscanner arbeiten heute mit Entfernungsauflösungen von 0,5–2 cm bei einer typischen Unsicherheit der Einzelmessung auf eine ebene Oberfläche von 3 cm. Die Unsicherheit des Ablenkwinkels liegt systemabhängig zwischen 0° – $0,02^\circ$. Die absoluten Fehler liegen in der gleichen Größenordnung. Hierbei ist festzustellen, dass Ablensysteme ohne mechanische Komponenten im optischen Pfad die höchste Stabilität und damit geringste Unsicherheit des Ablenkwinkels haben (Faserscanner beim TopoSys-System), Schwingspiegelsysteme (z. B. Optech ALTM) in der Praxis die größte Unsicherheit im Ablenkwinkel aufweisen, während kontinuierlich rotierende Polygonspiegelscanner dazwischen liegen (RIEGL LMS Q 280).

Die Genauigkeit der besten heute erhältlichen kommerziellen Sensornavigationssysteme liegt laut Herstellerangaben bei $0,005^\circ$ für die Roll- und Nickwinkel und bei $0,008^\circ$ für den Kurswinkel. Die Positionsgenauigkeit wird hauptsächlich durch das GPS-System, die Satellitenkonstellation und atmosphärische Bedingungen beeinflusst und liegt bei Tests meist bei 5–10 cm (SUJEW et al. 2002).

Für eine typische Flughöhe von 1000 m und einen Scanwinkelbereich von $\pm 20^\circ$ ergeben sich damit im ungünstigsten Fall die

in untenstehender Tabelle aufgeführten Fehlerwerte.

Diese Gegenüberstellung zeigt, dass die Fehlereinflüsse, die auf die direkte Sensor-Orientierung zurückgehen, bei den meisten Laserscanner-Systemen von den Fehlern des Laserscanners, insbesondere den Ablenkwinkelfehlern, dominiert werden. Setzt man schließlich diese Fehlerwerte in Beziehung zu den Messpunkt-Durchmessern, die je nach System bei der angenommenen Flughöhe von 1000 m bei 0,3 bis 1,0 m liegen, so ist offensichtlich, dass die heute erreichte Genauigkeit der Sensor-Navigationssysteme für die Anwendung in aktuellen Airborne Laserscanning-Systemen ausreicht.

Wirtschaftlichkeit

Die hohe Wirtschaftlichkeit des Airborne Laserscannings als Messverfahren resultiert aus einem weitgehend automatischen Messvorgang, der vollständig digitalen Aufnahme- und Verarbeitungskette und einem hohen Automatisierungsgrad bei der Auswertung. Eine Signalisierung oder die Ausbringung und Einmessung von Referenzmarken ist nicht erforderlich, typischerweise werden lediglich einzelne Referenzen zur Güteprüfung der Messdaten eingemessen.

Die tatsächlich erreichbare Wirtschaftlichkeit hängt allerdings auch von den bei der Auswertung doch erforderlichen manu-

| Fehler | Größe | Lage [m] | | | | Höhe [m] | |
|--------------------|---------------|-----------------|----------|-----------------------|----------|-----------|----------|
| | | in Flugrichtung | | quer zur Flugrichtung | | Spurmitte | Spurrand |
| | | Spurmitte | Spurrand | Spurmitte | Spurrand | Spurmitte | Spurrand |
| Entfernung | 0,03 m | – | – | 0,00 | 0,01 | 0,03 | 0,03 |
| Ablenkwinkel | $0,02^\circ$ | – | – | 0,35 | 0,35 | 0,00 | 0,13 |
| Orientierung | | | | | | | |
| Rollwinkel | $0,005^\circ$ | – | – | 0,09 | 0,09 | 0,00 | 0,03 |
| Nickwinkel | $0,005^\circ$ | 0,09 | 0,09 | – | – | 0,00 | 0,00 |
| Kurswinkel | $0,008^\circ$ | – | 0,05 | – | 0,00 | – | – |
| Position (x, y, z) | 0,08 m | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 |
| | | | | | | | |
| Summe | | 0,17 | 0,22 | 0,52 | 0,53 | 0,11 | 0,27 |

ellen Eingriffen ab, die sich aus der Zuverlässigkeit und Genauigkeit der Daten der direkten Sensor-Orientierung ergeben. In der Praxis zeigt sich, dass insbesondere bei der Auswertung der dGPS-Daten auch heute noch manueller Aufwand erforderlich ist, um ein optimales Ergebnis zu erreichen. So müssen die aktiven Satelliten und die Auflösung der Phasenmehrdeutigkeiten häufig interaktiv optimiert werden, um Spürhöhenversätze zu vermeiden.

Zur weitergehenden Automatisierung dieses Vorgangs liegt in einer stärkeren Verzahnung der GPS-Auswertung mit den IMU-Daten und der Rückführung der Ergebnisse der Laserdatenauswertung in die GPS-Auswertung noch Entwicklungspotenzial.

Resümee

Direkte Sensor-Orientierung ist ein wesentlicher Bestandteil moderner Airborne Laserscanning-Systeme. Erst sie ermöglicht einen wirtschaftlichen Einsatz dieses Messverfahrens. Die aktuell hochwertigsten Systeme zur direkten Sensororientierung erfüllen die Genauigkeitsanforderungen weitestgehend, die heute durch Airborne Laserscanning-Systeme gestellt werden. Schwächen sind technisch eher bei den Laserscannern selbst zu suchen. Der Trend zu kombinierten Systemen aus Laserscanner und Zeilenkamera (Toposys) oder digitaler Flächenbildkamera (Optech u.a.) stellt zwar höhere Genauigkeitsanforderungen an die direkte Sensororientierung als Laserscanner alleine dies tun, allerdings sind aktuelle Sensor-Navigationssysteme auch diesen Anforderungen heute im Allgemeinen bereits gewachsen.

Eine Erhöhung des Automatisierungsgrads bei der Auswertung der Daten der direkten Sensor-Orientierung, insbesondere der GPS-Daten, ist zur weiteren Steigerung der Wirtschaftlichkeit wünschenswert.

Literatur

BALTSAVIAS, E. P., 1999: Airborne laser scanning: Existing systems and firms and other resources.

– ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing **54** (2–3): 164–198.

FLOOD, M., 2003: Airbornelasermapping.com Industry News. – Internet: www.airborne-laser-mapping.com/ALMBrief.htm#BR#2, Aktualisierungsstand 25. 04. 2003, zuletzt abgerufen am 29. 04. 2003

HUG, C., 1994: The Scanning Laser Altitude and Reflectance Sensor – An Instrument for Efficient 3D Terrain Survey. – International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, **30** (1): 100–107.

HUISING, J. & GOMES PEREIRA, L., 1998: Errors and accuracy estimates of laser data acquired by various laser scanning systems for topographic applications. – ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, **53** (5): 245–261.

KRABILL, W. B. & HOGE, F. E., 1979: Application of the airborne oceanographic lidar to shoreline mapping. – Proceedings of the ASP-ACSM 39th Annual Convention, Washington D. C., 180–188.

NELSON, R., KRABILL, W. B. & MACLEAN, G., 1984: Determining Forest Canopy Characteristics Using Airborne Laser Data. – Remote Sensing of the Environment **15**: 201–212.

SÖHNE, W., HEINZE, O., HUG, C. & KÄLBERER, U., 1993: Positioning and Orientation of a Laser/Radar-Altitude Survey Flight with GPS and INS. – Proceedings of the Gyro Symposium, Stuttgart, September 1993.

SUJEW, S., SCHOLTEN, F., WEWEL, F. & PISCHEL, R., 2002: GPS/INS-Systeme im Einsatz mit der HRSC – Vergleich der Systeme Applanix POS/AV-510 und IGI AEROcontrol II-d. – Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation (PFG), **2003** (5): 333–340.

VOSSELMAN, G. & MAAS, H. G., 2001: Adjustment and filtering of raw laser altimetry data. – OEEPE Workshop on Airborne Laserscanning and Interferometric SAR for Detailed Digital Elevation Models, 01–03 March, Stockholm, Sweden: 62–72.

Anschrift des Autors:

Dr.-Ing. CHRISTOPH HUG
GeoLas Consulting, Sultenstraße 3
D-85586 Poing, Tel.: +49-8121-977342
Fax: +49-89-92185-445
e-mail: hug@geolas.com

Manuskript eingereicht: April 2003
Angenommen: Mai 2003

Two Czechoslovakian Army Officers Privatise Operations

ZDENEK KLUSON & LADISLAV NAGY, Hradec Králové, Tschechische Republik

Keywords: aerial photography, Argus Geo System, FOTOLET, history of aerial survey in Czechoslovakia and Czech Republic, CCNS, AEROcontrol

Summary: A short overview on the development of an airborne photogrammetric survey in Czechoslovakia is given along with the history of the first private aerial survey company within Czech Republic.

Zusammenfassung: Zwei Tschechoslowakische Armee-Offiziere gründen eine private Bildflug-Firma. Es wird ein kurzer Abriss der Entwicklung des photogrammetrischen Bildfluges in der Tschechoslowakei sowie des Aufbaues der ersten privaten Bildflugfirma in der Tschechischen Republik gegeben.

1 Aerial Survey in Czechoslovakia in the 20th Century

During previous years aerial photography of the Czechoslovakian territory for the national economy was provided by the ARMY FOTOLET. The main priority for military operations was to secure the photography. The Army formation was established in the nineteen thirties and after several organisational changes was located in Hradec Králové. For aerial survey applications, photogrammetric versions of different type's of aircraft were used, e.g. Siebel *SI-2* (Fig. 1), *Heinkel 111* (Fig. 2), *Ilyushin IL-14* (Fig. 3), *Antonow AN-30* (Fig. 4) and *Let L-410 FG* (Fig. 5) were operated.

When we joined the formation it was operating seven *L-410 FGs* and two *IL-14 FGs*. As camera equipment Carl Zeiss Jena *MRB* cameras and two Wild *RC10s* were used.

The images were mainly taken on black and white material with laboratory treatment of negatives and copies being performed on machines of Czechoslovakian production. The photography was planned for the entire year in advance and it was very difficult to add additional missions.



Fig. 1: Siebel *SI-2* survey aircraft, in operations with FOTOLET 1945–1957.



Fig. 2: Heinkel *He-111* survey aircraft, in operations with FOTOLET 1950–1957.



Fig. 3: Ilyushin *IL-14* survey aircraft, in operations with FOTOLET 1967–1994.



Fig. 4: FOTOLET Antonov *AN-30* survey aircraft in service since 1988, painted for OPEN SKIES operations. Mission planning and guidance is done by IGIs *WWMP* and *CCNS4*.



Fig. 5: Let *L-410 FG* survey aircraft, in operations with FOTOLET since 1985. Mission planning and guidance is done by IGIs *WWMP* and *CCNS4*.

About 30000 images were taken per annum and were carried out by a five man crew consisting of two pilots, navigator, technician and radio operator. The navigator was responsible for the aerial survey mission which he carried out from his position located in the transparent nose. He navigated

the pilot along the flight line which was a highly skilled and unreliable operation. Some of the navigators were real masters and were even able to fly large scale photography as well as large forest areas (no ground detail) in Slovakia with perfect results.

Exposure time was determined according to an exposure table and personal experience of the navigator. During 1988 an innovation of technique took place. *LMK* and *MSK4* cameras from Carl Zeiss Jena were purchased that were equipped with forward motion compensation, exposure meter and interchangeable lens cones. These cameras decreased dependability on manual exposure settings and taking aerial photographs during marginal weather conditions. After the revolution in 1989 the situation with purchasing new equipment got significantly better.

Therefore machines for colour and infrared processing, Durst horizontal enlargers, Barbieri density meter could all be introduced along with chemical and sensitometric quality control within the workplace.

In the early nineties an *LMK 2000* with gyro stabilised mount *SM 2000* and a *CCNS4* navigation system were also purchased. The changes in the army during this period enabled us to buy „Western technology“ and there was no problem with funding.

The *CCNS4* system was operated in one Let aircraft and viewed as competition for the navigator at first also experienced navigators doubted its worth. It is ironic that the most experienced navigators started to use it in the Let *410 FG*, where by means of an autopilot guided the aircraft on the flight line from the transparent nose. Another great occurrence that year was that all mission's scheduled for the year were cancelled and FOTOLET could take orders for aerial survey operations any time. In a relaxed political atmosphere it was possible to abolish flight restriction on military aircraft. Scanning and processing of infra red materials had been started as well.

There were some changes after 1993 which did not benefit the aerial survey ope-

rators as a lot of experienced pilots and navigators left, the army and some equipment was handed over to Slovakia due to the separation of the country. The formation was supposed to be relocated to Pardubice and linked together with two other military formations. Military assignments started to conflict with aerial survey operations conducted by civil organisations. At that time large privatisation of national concerns were being finalised and we were also considering the possibility of privatising FOTOLET. It ended as only an idea and cost counting exercise, which we find funny in hindsight.

2 Going Private

In 1994 our wish to privatise operations became stronger, resulting in a co-operation to set up the first private aerial survey company. A Turbo Cessna C-206 survey aircraft (Fig. 6) with CCNS4 and Carl Zeiss Jena LMK 15 was leased. We left the army together with two other colleagues and established the company *Argus Geo Systém*.

One of our colleagues was the former chief navigator who was placed in charge of mission planning and airborne operations, the other, the former chief of the laboratory, became responsible for our film developing. At the beginning everything was done in one room at the airport. This is the place where we had to deal with our customers, loading film into magazines, planning the missions, archiving the images etc. One year later we have moved to a rented office in the city of Hradec Králové. Step by step we have equipped our laboratory with black and white/colour, and colour reversal film



Fig. 6: Cessna 206 survey aircraft, Argus Geo System.



Fig. 7: Piper Turbo Aztec survey aircraft, long range version, of Argus Geo System.

developing machines. As time progressed we have been able to take over the Zeiss camera and the Cessna aircraft. We have continued equipping our laboratory with a Scanatron electronic copier and developing machine for colour copies and slides.

We have also extended our flight abilities with the purchase of a Piper Turbo Aztec (Fig. 7) and Zeiss LMK 2000 with SM 2000 gyro stabilised mount.

In the field of navigation a second CCNS system was purchased and both of the aircraft were equipped with differential GPS 12-channel L1/L2 receivers of the type Z-FLY from IGI for airborne kinematic operations. After introducing an AEROcontrol system in 2002, we have started to provide exterior orientation elements for our customers. Now we are finishing construction of a new company building, where we will start working by mid year.

Among our main customers are cadastral offices, open cast mining companies, Ministry of Agriculture, private photogrammetric companies and the Slovak Army.

As a final statement we can say that the transformation of two socialist officers into capitalist businessman was not easy. We had to learn a lot and without our expert colleagues it would have been almost impossible to start the business.

We had been educated and trained that the state was responsible for medical care, work, housing etc. Now we had to organise and plan this part of our lives as well. We think, we got it!

Address of authors:

Ing. ZDENEK KLUSON
Pilot LADISLAV NAGY
Directors of *Argus Geo Systém s.r.o.*
Hradecka 1151, CZ-500 02 Hradec Králové
Czech Republic, Tel./Fax: +42 49-5518849
e-mail: hk@argusgeo.cz

Manuskript eingereicht: April 2003

Angenommen: Mai 2003

Drehungen des Raumes und Koordinatentransformationen

ERWIN J. KRUCK, Aalen

Keywords: photogrammetry, IMU-calibration, Bore Sight Alignment, rotation of space, coordinate transformation, INS

Summary: *Rotations of Space and Coordinate Transformations.* Dealing with orientation or geometrical restitution of pictures in photogrammetry also means dealing with rotations and transformations. Therefore the assumption that all the respective questions should have been solved properly already seems to be logic. But in practice considerable problems arise when discrete values have to be transformed for real applications, especially when measured angles, e.g. of an inertial navigation system or of a photo theodolite have to be included in the calculations. Even photogrammetric textbooks and publications cannot grant support in every single case, as not all of them show the basic mathematical relations correctly.

For this reason the aim of this article is to promote the comprehension for rotations of space, coordinate transformations and measured angle values. It describes the basic relations and gives advices for practical applications and parametrisation of rotations. The indicated formulas grant a successful application especially for e. g. inertial navigation systems like AEROcontrol as well as for terrestrially measured orientation angles.

Zusammenfassung: Drehungen und Transformationen begegnen uns in der Photogrammetrie ständig, wenn es um die Orientierung oder geometrische Auswertung von Bildern geht. Man sollte also meinen, dass damit verbundene Fragestellungen vollständig beherrscht werden. In der Praxis zeigt sich jedoch immer wieder, dass erhebliche Probleme auftreten, sobald diskrete Werte für reale Anwendungen umzusetzen sind. Dies gilt insbesondere, wenn gemessene Winkel z. B. eines Inertialsystems oder eines Phototheodoliten in Berechnungen einbezogen werden sollen. Auch photogrammetrische Lehrbücher und Veröffentlichungen sind hier nicht immer eine Hilfe, da nicht alle die grundlegenden mathematischen Beziehungen korrekt darstellen.

Dieser Artikel soll das Verständnis für räumliche Drehungen, Koordinatentransformationen und gemessene Winkelwerte fördern. Er beschreibt daher die grundsätzlichen Beziehungen und gibt Empfehlungen zur praktischen Anwendung und zur Parametrisierung der Drehungen. Die angegebenen Formeln garantieren einen erfolgreichen Einsatz insbesondere z. B. für Inertialsysteme wie AEROcontrol sowie auch für terrestrisch gemessene Orientierungswinkel.

1 Einleitung

Als Geodäsie-Student habe ich es nie geschafft, wirklich tiefes Verständnis für die Fragen von mitgedrehten Achsen und raumfesten Achsen in der Photogrammetrie zu entwickeln. Als frischgebackener Assistent am Institut für Photogrammetrie und Ingenieurvermessungen der Universität Hannover wurde ich der Abteilung für Ingenieurvermessungen und Nahbereichsphotogrammetrie zugeordnet. Im Rahmen der

vorbereitenden Arbeiten zur Altstadtsanierung in Hameln war es 1978 eine meiner ersten Aufgaben, gemessene Orientierungswinkel von photogrammetrischen Aufnahmen in eine Bündelausgleichung mit einzubeziehen, um so Passpunkte an den wunderschönen historischen Gebäuden einzusparen. Die Bilder wurden damals weitestgehend mit einer SMK 120 aufgenommen, sodass auch eine Berücksichtigung der festen Beziehungen zwischen jeweils einem Aufnahme-paar sinnvoll erschien.

Die notwendigen mathematischen Beziehungen einschließlich der Taylor-Linearisierungen waren umfassend in einer Dissertation dargestellt. Da ich zu diesem Zeitpunkt bereits auf neun Jahre Erfahrungen in der Softwareentwicklung zurückblicken konnte, war ein entsprechendes Programm schnell entwickelt. Zu meinem Leidwesen zeigten sich in den Ergebnissen aber immer wieder unerklärliche Spannungen. Mir kamen daher Zweifel an der Richtigkeit der verwendeten Formeln (WROBEL & KRUCK 1978). Ein Studium der photogrammetrischen Lehrbücher führte auch nicht weiter, da es deutliche Widersprüche gab.

Durch Kontakte mit einem der mathematischen Institute an der Universität wurde ich auf das Buch „Matrizen“ von R. ZURMÜHL (1964) aufmerksam. Der §5 dieses Buches schaffte Klarheit. Zusammen mit dem „Handbuch der Vermessungskunde“ Band IIIa/1 (JORDAN, EGGERT & KNEISSL 1972) konnte ich dann die mathematischen Zusammenhänge richtig formulieren und in erfolgreiche Software umsetzen.

Im Laufe der Jahre bin ich dann gelegentlich immer wieder mit Kollegen zusammengetroffen, die dieselben Probleme mit dem Verständnis der mathematischen Zusammenhänge hatten. Zum Teil ist dies sicher auch durch eine ungeschickte Wahl der Begriffe „mitgedrehte Achsen“ und „raumfeste Achsen“ zurückzuführen. Das Wissen um eine korrekte Formulierung scheint im Laufe der Jahre etwas verschüttet worden zu sein – bei JORDAN, EGGERT & KNEISSL (1972) findet man eine richtige Darstellung, die Gründe sind jedoch (für mich) nur im Zusammenhang mit ZURMÜHL (1964) richtig zu verstehen.

Schreibt man eine Software für Bündelausgleichung, die als einzige Winkel die des photogrammetrischen Luftbildes enthalten, so ist es völlig egal, wie man die Formulierung der Winkel vornimmt. Ob mitgedreht oder raumfeste Achsen, ob Drehreihenfolge φ , ω , κ oder κ , φ , ω – es spielt gar keine Rolle. Die Neigungswinkel φ und ω sind bei normalen Luftbildern klein und eine Kontrolle der Werte ist ohnehin nicht möglich. Die Drehmatrix \mathbf{R} in der üblichen Kollinea-

ritätsgleichung (1) ist außerdem von ihrer Parametrisierung unabhängig, d. h. für ein konkretes Messbild existiert zu einem Bildvektor $|x', y', c|$ genau eine einzige Drehmatrix \mathbf{R} , die die Gleichung erfüllt. Sie kann durch einen Satz von drei Drehwinkeln oder Rodrigues-Parametern eindeutig beschrieben werden.

$$\mathbf{X} - \mathbf{X}_0 = \lambda \mathbf{R} \mathbf{x}' \quad (1)$$

Will man jedoch einen Zusammenhang herstellen zwischen den Winkeln der Drehmatrix \mathbf{R} und gemessenen Orientierungen, so kann ohne eine exakte Abfolge der Drehungen bzw. Drehmatrizen kein richtiges Ergebnis erzielt werden. Dies ist der Fall bei der Anwendung von inertialen Winkelmesssystemen wie AEROcontrol von IGI. Auch bei der Aufeinanderfolge von Drehungen, wie sie in analytischen und digitalen photogrammetrischen Systemen üblich sind, ist eine genaue Reihenfolge zu beachten (z. B. Drehung vom Modell ins Geländesystem sowie vom Modell in die beiden Bilder).

Aus Anlass der 25-Jahr-Feier der Firma IGI und der Bedeutung dieser Zusammenhänge für das IGI-System, habe ich mich zu einer grundlegenden Darstellung zu diesem Thema entschlossen.

2 Drehungen des Raumes und Koordinatentransformationen

Grundsätzlich sind zwei verschiedene Auffassungen zu unterscheiden: Die Drehung des Raumes und die Transformation von Koordinaten (ZURMÜHL 1964).

Bei der Drehung des Raumes betrachten wir eine Punktwolke in einem gegebenen Koordinatensystem. Ohne die Lage dieser Punktwolke zu verändern, drehen (und ggf. verschieben) wir das Achsenkreuz des Koordinatensystems und bringen es somit in eine neue Position relativ zu der Punktwolke (Abb. 1). Dies entspricht der Drehung um mitgedrehte Achsen. Nach meiner Auffassung ist jedoch der Begriff von der Drehung des Raumes sehr viel zutreffender und anschaulicher. Nach ZURMÜHL (1964) steht die Drehmatrix dabei am **neuen** Vektor.

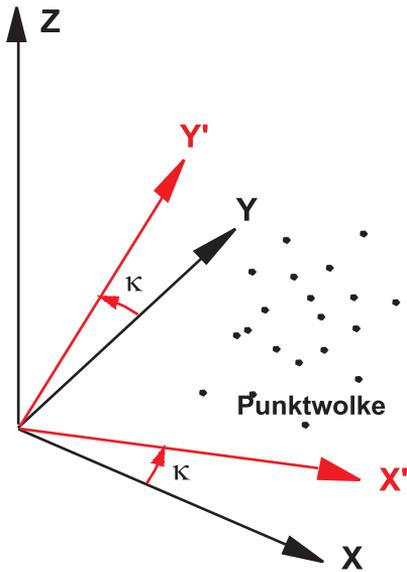


Abb. 1: Drehung des Raumes um κ .

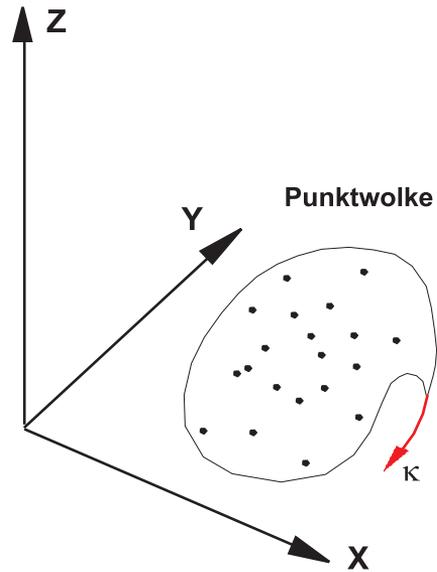


Abb. 2: Transformation einer Punktwolke.

$$\mathbf{a} = \mathbf{R}\mathbf{a}^R \tag{2}$$

(2) stellt also mit \mathbf{a}^R den Vektor \mathbf{a} nach Drehung des Raumes (um mitgedrehte Achsen) um \mathbf{R} dar.

Bei der Transformation von Koordinaten betrachten wir nur ein einziges Koordinatensystem, dessen Achsen im Raum festliegen (raumfeste Achsen). Die Punktwolke wird innerhalb dieses Raumes bewegt und in Orientierung und Position verändert (Abb. 2). Die mathematische Darstellung ist:

$$\mathbf{a}^R = \mathbf{R}\mathbf{a} \tag{3}$$

In (3) ist \mathbf{a}^R der mit \mathbf{R} transformierte Vektor \mathbf{a} . Beide Vorstellungen verhalten sich also genau invers zueinander.

Werden nun mehrere Drehungen nacheinander ausgeführt, so ist (2) mehrfach anzuwenden. Es sei \mathbf{x} ein Vektor im ursprünglichen Grund-System (Ground, G). Der Raum wird um κ gedreht (4). Diese Drehung vom Grundsystem um κ ergibt mit \mathbf{x}^κ den im gedrehten Raum dargestellten Vektor \mathbf{x} .

Die nächste Drehung von \mathbf{x}^κ erfolgt um φ (5). Die Matrix $\mathbf{R}_\varphi^\kappa$ dreht den bereits um κ gedrehten Raum weiter in einen zusätzlich um φ gedrehten Raum. Der Vektor \mathbf{x} wird nun zu $\mathbf{x}^{\kappa\varphi}$. Die nächste Drehung erfolgt mit $\mathbf{R}_\omega^\varphi$ um ω aus dem bereits um κ und φ gedrehten Raum heraus. Der Vektor $\mathbf{x}^{\kappa\varphi\omega}$ ist also in einem um alle drei Winkel gedrehten Raum dargestellt (6).

$$\mathbf{x} = \mathbf{R}_G^\kappa \mathbf{x}^\kappa \tag{4}$$

$$\mathbf{x}^\kappa = \mathbf{R}_\kappa^\varphi \mathbf{x}^{\kappa\varphi} \tag{5}$$

$$\mathbf{x}^{\kappa\varphi} = \mathbf{R}_\varphi^\omega \mathbf{x}^{\kappa\varphi\omega} \tag{6}$$

Setzen wir nun (6) in (5) und das Ergebnis daraus wieder in (4) ein, so folgt (7):

$$\mathbf{x} = \mathbf{R}_G^\kappa \mathbf{R}_\kappa^\varphi \mathbf{R}_\varphi^\omega \mathbf{x}^{\kappa\varphi\omega} \tag{7}$$

oder kurz

$$\mathbf{x} = \mathbf{R}_\kappa \mathbf{R}_\varphi \mathbf{R}_\omega \mathbf{x}' \tag{7}$$

Vektor \mathbf{x}' in Gleichung (7) stellt somit den Vektor \mathbf{x} in einem um κ , φ und ω gedrehten Raum dar.

Es ist deutlich, dass aufeinanderfolgende Drehungen des Raumes grundsätzlich durch Multiplikation der Drehmatrizen bewirkt werden, keinesfalls durch Addition der Winkel. (7) kann auch als fortgesetzte Transformation von x' nach x aufgefasst werden, dann aber mit der Reihenfolge ω , φ , κ .

3 Parametrisierung, Singularitäten und Wahl der Drehreihenfolge

Die Gleichung (7) ist immer frei von Singularitäten, da alle R orthogonale Matrizen sind, d.h. ihre Inverse ist gleich der Transponierten und existiert daher in jedem Falle. Die *Parametrisierung* von R mit Drehwinkeln führt jedoch regelmäßig zu Problemen, wenn der zweite Drehwinkel ein rechter Winkel wird. Die erste Drehachse wird dann genau in die dritte Drehachse hineingedreht, sodass der erste und der dritte Winkel nicht mehr voneinander unabhängig sind. Daraus folgt, dass mit einem einzigen Satz von Drehwinkeln nicht alle Raumrichtungen beschrieben werden können. Abhilfe bietet z. B. eine Parametrisierung nach RODRIGUES. Sie ist immer dann zu empfehlen, wenn es nicht erforderlich ist, mit den Parametern eine Anschauung zu verbinden. Alternativ kann man zwei verschiedene Winkeldefinitionen zur Parametrisierung wählen, die den Vorteil einer sehr guten Anschaulichkeit bieten:

Abb. 3. und Abb. 4. zeigen eine Empfehlung zur Definition von Drehwinkeln für terrestrische Bilder und für Luftbilder. In beiden Definitionen sind für Standardaufnahmefälle die Drehwinkel Null. Entscheidend ist zusätzlich die Wahl der Drehreihenfolge:

Um für terrestrische Drehwinkel eine Verknüpfung zwischen den Orientierungswinkeln eines Bildes und von einem Phototheodoliten gemessenen Aufnahmerichtungen herzustellen sowie für eine gute Anschaulichkeit der Aufnahmerichtungen ist dringend die Drehreihenfolge φ , ω , κ empfohlen. Dann ist φ der Horizontalwinkel, ω der Höhenwinkel und κ die Bilddrehung. Die Kol-

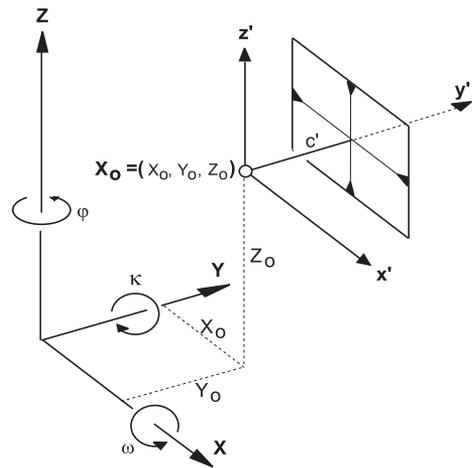


Abb. 3: Terrestrische Drehwinkel.

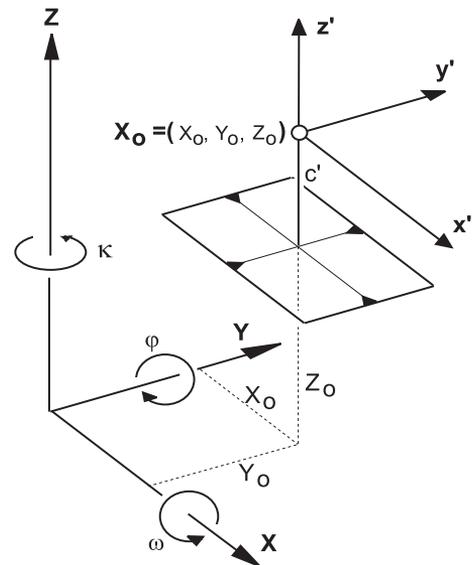


Abb. 4: Luftbilddrehwinkel.

linearitätsgleichung lautet dann für terrestrische Bilder:

$$X - X_0 = \lambda R_\varphi R_\omega R_\kappa x' \tag{8}$$

Für Luftbilder werden in der Praxis die Drehreihenfolgen φ , ω , κ oder ω , φ , κ bevorzugt. Im von mir entwickelten Bündelprogramm BINGO wird φ , ω , κ benutzt.

Diese Festlegung würde ich heute anders treffen, nämlich κ , φ , ω , weil dann auch bei schrägen Luftaufnahmen eine gute Anschauung der tatsächlichen Aufnahmerichtung ermöglicht wird. Abb. 5 zeigt einen Bildflieger, der in Steigflug mit $\varphi = 33$ gon Aufnahmen macht. Wir unterstellen hier Schrägaufnahmen seitlich aus dem Flieger heraus mit $\omega = 50$ gon. Bei West-Ost Flugrichtung ist $\kappa = 0$ gon. In diesem Fall sind auch bei einer Drehreihenfolge φ , ω , κ die Winkel $\varphi = 33$ und $\omega = 50$.

Wird nun nur die Flugrichtung auf $\kappa = 250$ geändert (Abb. 6), so bleiben die Winkel $\varphi = 33$ und $\omega = 50$ nur bei einer Drehreihenfolge κ , φ , ω mit ihren Werten erhalten. Bei einer Drehreihenfolge φ , ω , κ sind die Winkel dann $\varphi = -56$, $\omega = -16$ und $\kappa = -156$. Die Anschauung ist also vollständig verloren gegangen. Das liegt daran, dass die κ -Drehung in einem Raum erfolgt, der bereits um φ und ω gedreht ist, also selbst schräg im Raum liegt.

$$\mathbf{X} - \mathbf{X}_0 = \lambda \mathbf{R}_\kappa \mathbf{R}_\varphi \mathbf{R}_\omega \mathbf{x}' \tag{9}$$

Für Luftbilder wird daher die Kollinearitätsgleichung (9) empfohlen.

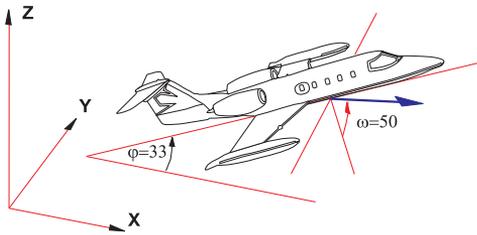


Abb. 5: Flugsituation bei $\kappa = 0$.

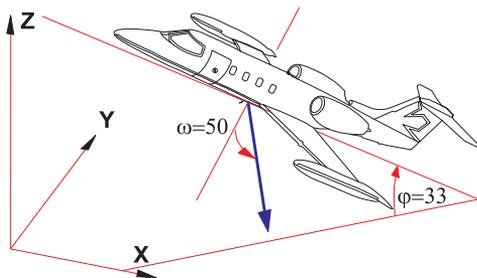


Abb. 6: Flugsituation bei $\kappa = 250$.

4 Inertialsysteme

Auch bei der Kalibrierung von Inertialsystemen wie AEROcontrol sind Koordinatensysteme und Drehreihenfolgen sorgfältig auszuwählen. Besondere Beachtung kommt der Reihenfolge der Drehmatrizen zu. Eine nicht strenge Formulierung der Beziehungen führt schnell zu falschen Ergebnissen. Häufig wird in der Praxis beobachtet, dass sogar die aus einer Aerotriangulation ermittelten Drehwinkel direkt durch Subtraktion mit den Messwerten der IMU (inertial measurement unit) verglichen werden. Dies ist in jedem Falle unzulässig. Die Drehung zwischen IMU und Kamera kann nur mit einer Drehmatrix formuliert werden.

Da auch bei sorgfältigster Montage der IMU an der Kamera immer eine kleine Schiefstellung zwischen den Achsen der IMU und der Kamera übrig bleibt, ist diese Schiefstellung durch Kalibrierung zu bestimmen. Für die Praxis wird empfohlen, die gegenseitige Schiefstellung der Achsen direkt in einem Schritt innerhalb der Bündeltriangulation zu bestimmen. Dazu sind dann nicht einmal Passpunkte erforderlich, weil die GPS Daten den Bildverband bei sinnvoller Anordnung voll ausreichend stützen.

Die IMU liefert pro Foto die Orientierung der IMU – nicht des Fotos. Gegeben sei für ein Foto die Drehmatrix der IMU \mathbf{R}_G^I , die das Objektsystem in den IMU-Raum dreht. Aus jedem Punkt \mathbf{x} im Objektraum wird nach (10) \mathbf{a}^I im IMU-Raum. Die Drehung des Objektraumes ins Foto wird mit (11) beschrieben.

$$\mathbf{x} = \mathbf{R}_G^I \mathbf{a}^I \tag{10}$$

$$\mathbf{x} = \mathbf{R}_G^F \mathbf{x}' \tag{11}$$

Die Weiterdrehung des Bildraumes ins System der IMU erfolgt mit (12). Durch Einsetzen von (12) in (11) und gleichsetzen mit (10) erhalten wir die Beziehung (13) zwischen Foto und IMU. Die Matrix \mathbf{R}_F^I ist die kalibrierte Weiterdrehung des Bildes ins System der IMU.

$$\mathbf{x}' = \mathbf{R}_F^I \mathbf{a}^I \quad (12)$$

$$\mathbf{R}_G^I = \mathbf{R}_G^F \mathbf{R}_F^I \quad (13)$$

Die grundlegende Beziehung (13) ist die Basis für die Kalibrierung der IMU. Gleichgültig ob die Elemente der Matrix \mathbf{R}_F^I an einem Testblock bestimmt werden, oder ob eine Bündelblockausgleichung durch IMU-Werte stabilisiert werden soll, es wird für alle Fälle empfohlen, diese Matrixelemente simultan in der Bündelblockausgleichung zu ermitteln. Dazu ist eine Linearisierung nach TAYLOR vorzunehmen, die dann auf ein recht umfangreiches Gleichungssystem führt. Φ , Ω , \mathbf{K} sind die gemessenen Winkel der IMU, $v\Phi$, $v\Omega$, $v\mathbf{K}$ deren Verbesserungen und $d\phi$, $d\omega$, $d\kappa$ die gesuchten Kalibrierwinkel.

$$\begin{aligned} \Phi + v\Phi &= f_1(\phi, \omega, \kappa, d\phi, d\omega, d\kappa) \\ \Omega + v\Omega &= f_2(\phi, \omega, \kappa, d\phi, d\omega, d\kappa) \\ \mathbf{K} + v\mathbf{K} &= f_3(\phi, \omega, \kappa, d\phi, d\omega, d\kappa) \end{aligned} \quad (14)$$

Im Bündelblockprogramm BINGO werden diese Kalibrierwinkel automatisch als Unbekannte berücksichtigt, sobald IMU-Winkel als Beobachtungen gegeben sind.

5 Wahl des Koordinatensystems

Eine IMU liefert die Winkel für jeden Punkt sofort direkt im Schwerfeld der Erde. Jeder Messwert hat also seinen Bezug in einem lokalen Tangentialsystem, dessen Ursprung im jeweiligen Messpunkt liegt. Die Nordrichtung ist bis auf sehr kleine Restfehler Geographisch Nord. Liegen die Passpunktkoordinaten im UTM oder Gauß-Krüger-System vor, so sind die IMU-Winkel lediglich um die Meridiankonvergenz zu korri-

gieren um sie ebenfalls streng in ein solches System zu übertragen.

Die Messwerte der IMU liefern keinerlei Anlass, eine Übertragung aller Koordinaten und Winkel in ein lokales Tangentialsystem vorzunehmen. Diese von anderen Autoren teilweise vorgeschlagene Vorgehensweise ist bezüglich der IMU-Winkel unbegründet. Allenfalls könnten die verzerrten Koordinaten von Passpunkten und DGPS-Projektionszentren eine solche Vorgehensweise begründen. Wer also bisher trotz Projektionsverzerrungen von UTM oder Gauß-Krüger seine Bündelblöcke in diesen Systemen ausgeglichen hat, muss wegen der IMU-Winkel auf keinen Fall eine Änderung der Vorgehensweise vornehmen.

Bisherige Erfahrungen rechtfertigten noch in keinem Falle einer normalen Bündelausgleichung einen Übergang in ein lokales Tangentialsystem.

Literatur

- JORDAN, W., EGGERT, O. & KNEISSL, M., 1972: Handbuch der Vermessungskunde. – Photogrammetrie, Band III a/1, Stuttgart.
- WROBEL, B. & KRUCK, E., 1978: Passpunktbestimmung an Fassaden durch Bündelblockausgleichung mit Bildern von Stereokammern. – CIPA-Symposium, Sibenik, Oktober 1978.
- ZURMÜHL, R., 1964: Matrizen. – Berlin.

Anschrift des Autors:

Dr.-Ing. ERWIN J. KRUCK
Geoinformatics & Photogrammetric
Engineering, Tännichweg 3, D-73430 Aalen,
Tel.: 49-7361-931434, Fax: 49-7361-931435
e-mail: info@gip-aalen.de

Manuskript eingereicht: April 2003
Angenommen: Mai 2003

From Airborne Digital Raw Data to Image Maps

RUPERT MÜLLER, GINTAUTAS PALUBINSKAS, PETER REINARTZ, MANFRED SCHROEDER, VOLKER AMANN & ROLF STÄTTER, Oberpfaffenhofen

Keywords: aerial photogrammetry, airborne scanner data, direct georeferencing, radiometric correction, mosaicking, image maps

Zusammenfassung: *Flugzeug-Scannerdaten: Von digitalen Rohdaten zu Orthobildern.* In den letzten Jahren werden bei Anwendungen der Flugzeugfernerkundung, unter anderem für die Nutzung in Geographischen Informationssystemen, immer häufiger zusammenhängende Bildkarten als einzelne Bildstreifen verwendet. Die häufigsten Probleme während des Mosaikings sind bedingt durch Fehler bei der Ortho-Rektifizierung, durch radiometrische Unterschiede in den einzelnen Bildstreifen quer zur Flugrichtung sowie zwischen den einzelnen Streifen. Die vorgeschlagene Prozedur für die Erstellung von ortho-rektifizierten Bildkarten besteht daher aus drei Schritten. Für die einzelnen Bildstreifen wird zunächst eine Normalisierung mit Hilfe einer bildbasierten empirischen Korrekturmethode, welche sämtliche blickwinkelabhängigen Effekte berücksichtigt, durchgeführt. Die einzelnen Bildstreifen werden anschließend mit Hilfe der aufgezeichneten Lage- und Positionsdaten des IGI *CCNS/AEROcontrol-IIB* Systems, einem digitalen Höhenmodell und der Methode der direkten Georeferenzierung ortho-rektifiziert. Um die Unterschiede zwischen den einzelnen Bildstreifen zu korrigieren, wird eine radiometrische Korrekturmethode verwendet, die die Bildinformation in den Überlappungsbereichen der Streifen benutzt. Die Anwendungen auf Daten des multispektralen Flugzeugscanners *DAEDALUS AADS 1286 ATM* zeigen die Effektivität und die Nutzungsmöglichkeiten der vorgeschlagenen Methodik besonders für die thematische Analyse und die Integration der Daten in ein GIS.

Summary: Recent airborne remote sensing applications show a tendency from an interpretation of single image strips to an evaluation of extended image maps for further usage in data fusion and GIS applications. Most of the problems during the mosaicking process are caused by geometric ortho-rectification errors, radiation variations across the single image strips and between adjacent image strips. The proposed procedure for generating ortho-rectified image maps consists of the following three steps. Within an image strip radiometric normalization is performed using an image-based empirical radiometric correction method, which accounts for sensor viewing angle effects. Individual strips are then ortho-rectified applying the direct georeferencing approach by using the onboard IGI *CCNS/AEROcontrol-IIB* system for the GPS/IMU integration and a digital elevation model. To remove the between-strip radiometric variations we propose to use a radiometric correction method, which is based on the information contained in the overlapping region of the image strips. The processing of data acquired by airborne multi-spectral scanner *DAEDALUS AADS 1286 ATM* show the effectiveness and potential of the proposed method especially for the thematic analysis applications.

1 Introduction

Aerial survey of large areas with multispectral scanners requires the generation of image mosaics, which are usually composed of several image strips (TAYLOR 2001). The quality of the produced mosaic depends mainly on the radiometric and geometric characteristics of individual image strips after the correction.

Especially airborne data obtained from sensors having a wide field of view (e.g. up to 90 degrees) exhibit substantial viewing angle dependence of radiances across the image swath width due to illumination, atmospheric conditions, and BRDF of different objects. Usually these radiometric corrections are derived by physical modeling (OLBERT 1998, RICHTER et al. 2002), which requires in-situ field and atmospheric measurements during the acquisition of the image data. Since in many cases such measurements are not performed simultaneously during aircraft overflight, empirical methods are necessary to achieve radiometrically homogeneous image data. Under the assumption of a stable and homogeneous atmosphere (justified for airborne data) the main radiometric distortions across an image strip are resulting from the variation of the sensor viewing angle (STAENZ et al. 1986, KENNEDY et al. 1997). To perform relative normalization of these radiometric distortions within the image strip we are using an image-based empirical radiometric correction method EMRACO (PALUBINSKAS et al. 2002, PALUBINSKAS et al. 2003).

After the radiometric normalization the individual strips are ortho-rectified using our direct georeferencing software RECTIFY (MÜLLER et al. 2002), which takes into account the following parameters: the exterior (measured by an IGI *CCNS/AERO contro-I Iib*) and interior orientation of the imaging system, the topography of the earth surface, the boresight misalignment angles between navigation sensor and camera system and the mapping coordinate reference system. One of the advantages of this approach in comparison with the conventional geometric transformation methods

is that no ground control points are required.

Even if the individual image strips are radiometrically normalized, the seam line can be visible between the strips in the produced mosaic due to the change of the intensity and direction of solar illumination during the acquisition of adjacent image strips. Conventional mosaicking methods try to remove the between-strip radiometric variations by adjusting the mean, standard deviation values or histograms of the overlapping region. The seam line is drawn manually or goes through the tie points (e.g. found by using matching algorithm) (AFEK & BRAND 1998) in the overlapping region. We propose another radiometric correction method RADMOS, which is based on the unsupervised clustering in the overlapping region of the image strips. The mosaicking of two image strips is performed along the seam line, which is drawn along the boundaries of clusters. Thus a seamless mosaic can be created.

Each of these three steps of the mosaicking procedure are presented below in more detail followed by the application to airborne scanner data.

2 Radiometric Normalization

From general considerations of radiation transfer from the ground target to the sensor (under some assumptions) we can derive the empirical image-based radiometric correction method EMRACO (PALUBINSKAS et al. 2002, PALUBINSKAS et al. 2003), which corrects the radiances of pixels at the sensor for sensor viewing angle effects and indirectly for BRDF effects of the surfaces. The radiance at any viewing angle (off-nadir) is normalized to the radiance at the selected reference angle, usually in nadir direction. In order to implement such type of correction we need the objects (or classes or surface types) to be extracted from the image data.

We assume, that in some region of an image, around the reference angle (nadir), the pixel values are not or minimally distorted.

This assumption is valid for nadir-looking sensors.

This selected region of the image (usually symmetric on both sides of nadir) is used to initialize the whole procedure, which consists of several steps. First, the initial region of an image is clustered by an extended k-means algorithm, which defines automatically the number of clusters (classes) depending on the complexity of an image (PALUBINSKAS 1999). Then for each cluster an average intensity profile along the scan direction is calculated. These profiles (initially defined in a central part of an image line) are extrapolated to the whole swath width of an image by a polynomial approximation. Finally, applying a linear regression method over all clusters to the radiometric transfer equation results in a radiometric correction function for each sensor viewing angle with which the pixel intensity across the scan line can be relatively adjusted to the pixel intensity of the reference viewing direction. The procedure is iterative, that is the correction is first performed for a narrow central part of an image. Then the procedure is initialized with this corrected image region and repeated until the whole image swath width is corrected. This object-based correction method allows a relative correction of the local radiometric distortions.

3 Ortho-Rectification

The line scanner imagery are geometrically distorted with respect to a mapping frame. The upcoming high precision direct georeferencing systems consisting of a combined GPS/IMU and one or more imaging sensors can be used for orthoimage production provided a digital elevation model (DEM) is available in the case of single imagery. The utilization of direct measurements of the image exterior orientation parameters by a GPS/IMU system for image rectification is called Direct Georeferencing and allows a fast automatic ortho-rectification of the remotely sensed data. The basic concept of direct georeferencing, addressed by various authors in the last years (BÄUMKER & HEIMES 2001, CRAMER & STALLMANN 2001, EL-

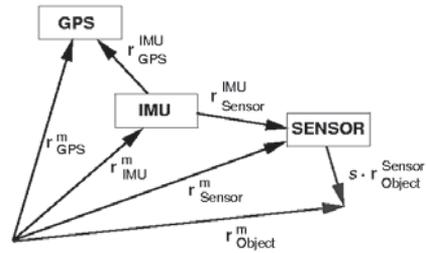


Fig. 1: Concept of direct georeferencing.

LUM & EL-SHEIMY 2002, GRIMM 2001, JAKOBSEN & WEGMANN 2001, MOSTAFA 2001, MÜLLER et al. 1999, MÜLLER et al. 2002) is illustrated in Fig. 1.

The collinearity concept is the basis for all direct georeferencing formulas, where the coordinates of an object point r_{Object}^{Sensor} measured in the imaging sensors coordinate frame are related to the coordinates r_{Object}^m in the mapping coordinate frame

$$r_{Object}^m = r_{Sensor}^m + s \cdot R_{IMU}^m \cdot R_{Sensor}^{IMU} \cdot r_{Object}^{Sensor}$$

with the actual position of the projection center of the sensor

$$r_{Sensor}^m = r_{GPS}^m - R_{IMU}^m \cdot r_{GPS}^{IMU} + R_{IMU}^m \cdot r_{Sensor}^{IMU}$$

The lower indices of the vectors r indicate the position of the points, whereas the upper indices denote the coordinate frame in which the vector is measured. The notation of the indices of the rotation matrices R indicates the transformation direction where the lower index represents the source system and the upper index the destination system. The meaning of the various parameters is explained in Tab. 1.

In a first step of the orthoimage production the six parameters of the exterior orientation (position and attitude data normally corrected by the lever arm calibration values) are synchronized with each image line. As input for the orthoimage processor serves the exterior orientation for each scan line, the model of the sensor (whiskbroom or pushbroom system) in combination with the calibrated interior orientation and a di-

Tab. 1: Definition of parameters for direct georeferencing.

| | |
|-----------------------|--|
| m | Index which represents the mapping coordinate frame. For the mapping coordinate frame the unique cartesian coordinate system of a local topocentric system (LTS) with a fundamental point usually located at the center of an image strip can be used as intermediate coordinate frame (or in approximation a map projection like UTM). The position and attitude data have to be transformed to the mapping frame. But the re-sampling of the image takes place in a map projection coordinate frame. |
| r_{Object}^m | Vector to the object point on the earth surface in the mapping frame, which has to be determined. |
| r_{Object}^{Sensor} | Vector from image point, which is measured by the sensor pixel location, to the corresponding object point on the earth surface in the sensor frame. |
| r_{Sensor}^m | Vector to the projection center of the sensor in the mapping frame, which is calculated using the integrated GPS/IMU data and the lever arm correction values measured during the hangar calibration procedure. Normally determined during postprocessing step. |
| R_{Sensor}^{IMU} | Rotation matrix between IMU and sensor coordinate frames, which accounts for possible tilt angles of the sensor mirror, stereo view angles and boresight misalignment angles (determined during calibration). |
| R_{IMU}^m | Rotation matrix between IMU and mapping coordinate frames, which is measured by the GPS/IMU system. |
| s | Scale factor determined by a DEM (or stereo processing techniques). |
| r_{GPS}^m | Measured vector to GPS antenna given in the mapping coordinate frame. |
| r_{GPS}^{IMU} | Vector from IMU to GPS measured in the IMU coordinate frame during hangar calibration (lever arm determination). |
| r_{Sensor}^{IMU} | Vector from IMU to sensor projection center measured in the IMU coordinate frame during hangar calibration (lever arm calibration values). |
| r_{Sensor}^{IMU} | Vector to IMU in the mapping coordinate frame, which is calculated using the integrated GPS/IMU data and lever arm corrections. |

gital elevation model (DEM). Applying the rigorous collinearity equation the intersection point of each sensor look direction with the DEM is iteratively calculated. The resulting irregular grid is filled with bilinear interpolated pixel values. The orthoimage processor RECTIFY (MÜLLER et al. 2002) supports a multitude of map projections (including local topocentric or ECEF coordinate systems) and geodetic datum transformations as well as ellipsoid to geoid transformations.

The boresight misalignment angles (the relation between IMU and sensor coordinate system) are determined by ground control points (calibration field) using an iterative least squares fit of the linearized collinearity equation.

For high quality direct georeferencing it is important to take into account all geometric parameters influencing the rectification process. Especially for sensors with a wide field of view the accuracy of the orthoimage is directly related to the accuracy of the used DEM.

For the accuracy assessment orthoimages of three different multispectral sensors (see Tab. 2) were investigated. The image data were acquired from the same test site located at DLR Oberpfaffenhofen.

An IGI CCNS/AEROcontrol with an IMU IIb (GRIMM 2001) was used for the determination of the parameters of the exterior orientation. The manufacturer's instructions of the accuracy of the GPS/IMU system for the position is about 0.1–0.3 m

RMS using a GPS reference station and about 1–3 m RMS using the *OmniSTAR* satellite service. The accuracy for the heading angle is 0.1° and for the roll and pitch angle 0.01° .

The line scanners *ROSIS-03* and *DAIS 7915* were mounted together in the aircraft with the *CCNS/AEROcontrol*. The *Daedalus 1256* scanner was separately flown with the IMU directly mounted and aligned on the base plate of the scanner to minimize the boresight misalignment angles. The lever arm corrections were taken into account during postprocessing of the raw position and attitude data with the software delivered with the *CCNS/AEROcontrol* hardware resulting in the position of the projection centers of the scanners. Unfortunately the *OmniSTAR* service for the GPS position resulting in a position accuracy of 1–3 m RMS, was activated during the *Daedalus 1256* data acquisition resulting in worse position measurements than using a GPS reference station. For the *ROSIS-03* and *DAIS 7915* the reference station located on one of the roofs of the DLR buildings could be used with a position accuracy of about 0.1 m. For the synchronization of the elements of the exterior orientation with the image scan lines the PPS (Pulse per Second) of the GPS for *ROSIS-03* and *Daedalus 1256* was used, whereas *DAIS 7915* had an independent GPS clock. A DEM derived from the ERS-1/2 Tandem mission with 5–10 m vertical accuracy and 25 m horizontal resolution served as input for the rectification of the three images. The comparison of this DEM with a DEM (covering only partially the test site) derived from an aerial image stereo pair con-

firms the accuracy of the used DEM with mean height differences of about one meter measured at six corresponding points. The boresight misalignment angles were determined with 7 GCPs for *DAIS 7915* and *Daedalus 1256* and 5 GCPs for *ROSIS-03* well distributed over the scanned image area. The accuracy of the GCPs was better than 0.1 m. The comparison of the control points (also measured with DGPS) with the corresponding points manually measured in the orthoimages is listed in Tab. 3.

For the quality assessment the measurements were performed with pixel size accuracy (no subpixel measurement). For *DAIS 7915* five independent evaluators investigated the quality of the orthoimage with deviations of about 1m in the relative and absolute coordinates. The achieved geometric accuracy of the orthoimages for all three investigated sensors is in the range of 0.3 (*DAIS 7915*), 0.6 (*Daedalus 1256*) and 0.8 (*ROSIS-03*) pixel size.

For the *Daedalus 1256* scanner the moment of inertia of the mass of the rotating scan mirror leads to a non constant rotation speed during a roll movement which is corrected with a linear model resulting in an improvement of 0.95 m in the RMS values. Examples of the ortho-rectified scanner images of the three sensor types are shown in Fig. 2.

4 Radiometric Normalization Between Image Strips

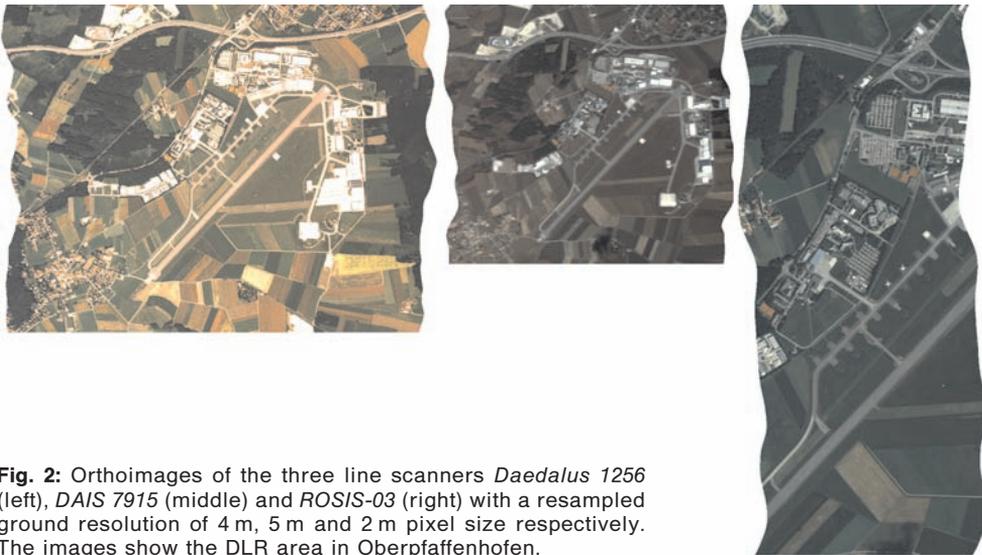
To remove the radiometric variations between image strips we use the radiometric correction method RADMOS, which is

Tab. 2: Parameters of the three used airborne scanners.

| Sensor | <i>ROSIS-03</i> | <i>DAIS 7915</i> | <i>Daedalus 1256</i> |
|---------------------------|-----------------|------------------|----------------------|
| Type | Pushbroom | whiskbroom | whiskbroom |
| FOV [$^\circ$] | 17.37 | 51.20 | 85.92 |
| IFOV [mrad] | 0.59 | 3.3 | 2.5 |
| Altitude above ground [m] | 3230 | 3230 | 2030 |
| Ground resolution [m] | 1.9 | 10.7 | 5.1 |

Tab. 3: Accuracy of the airborne orthoimages and the determined boresight misalignment angles.

| Sensor | <i>DAIS 7915</i> | | <i>ROSIS-03</i> | | <i>Daedalus 1256</i> | |
|---|-----------------------------|--------|-----------------------------|--------|---------------------------|--------|
| resolution [m] | 10.7 | | 1.9 | | 5.1 | |
| control points | 22 | | 12 | | 21 | |
| direction | north | east | north | east | north | east |
| absolute deviation [m] | 2.69 | - 2.22 | 1.43 | - 0.04 | - 0.05 | - 3.03 |
| RMS at GCP [m] | 3.65 | 3.21 | 1.67 | 1.21 | 2.92 | 3.19 |
| boresight misalignment (ω , φ , κ) [°] | - 0.375 0.867 - 0.479 | | - 0.399 - 1.317 0.140 | | 0.419 0.242 - 0.049 | |

**Fig. 2:** Orthoimages of the three line scanners *Daedalus 1256* (left), *DAIS 7915* (middle) and *ROSIS-03* (right) with a resampled ground resolution of 4 m, 5 m and 2 m pixel size respectively. The images show the DLR area in Oberpfaffenhofen.

based on the information contained in the overlapping region of the images. First, the overlapping region is clustered by an extended k-means clustering algorithm, which automatically detects the different clusters (surface classes) in the region (PALUBINSKAS 1999). Then, the means of the clusters, calculated for each image strip separately, are used in the linear regression to derive the linear dependence between the radiances in the two image strips. This linear transformation is used for the radiometric normalization of image strips before the mosaicking. Finally, the mosaicking of two image strips is performed along the seam line, which is

drawn along the boundaries of clusters, found after the unsupervised clustering in the overlapping region of the two image strips.

The whole mosaicking procedure is fully automatic and does not require any manual user interaction.

For the experiments the data acquired by airborne multi-spectral scanner *DAEDALUS AADS 1268* "Airborne Thematic Mapper" (ATM) were used. This DLR-own sensor is an opto-mechanical line scanner with 716 pixels in a line, an instantaneous field of view of 2.5 mrad and the total field of view of 86 degrees. At the altitude of 1000

meters it produces an image swath width of 1860 meters and a ground resolution of 2.5 meters. The data are recorded in eleven bands of the visible (5 channels), near- (3), middle- (2) and thermal- (1) infrared portions of the electromagnetic spectrum ranging from 0.4 to 13 μm .

In Fig. 3 (upper image) the mosaic created from five radiometrically unprocessed image strips (pseudo-color composite of bands: 0.45–0.52 μm , 0.63–0.69 μm and 0.91–1.05 μm) in the test site Gumattenkirchen (Bavaria) is shown. We can see clearly the radiometric distortions across the image strips due the sensor viewing angle effects and between-strips radiometric differences. The result of the proposed radiometric correction method is illustrated in the Fig. 4 (lower image), which shows a seamless radiometrically homogenous image mosaic.

5 Applications

The range of applications comprises: integrating the orthoimage mosaics into digital topographic maps, thematic classification, data fusion, integrating all processing results into GIS and utilization of these data for 3D visualization. Some examples are given to show the potential of the generated image maps. All examples given have been acquired with the above mentioned Daedalus scanner.

The first example (Fig. 4) shows a part of an image mosaic of three flight strips in northern Germany (Havelburg), acquired shortly after the big flooding disaster of the river Elbe in August 2002, and integrated into a 1:25000 topographic map. The good fit of streets and linear features at the border lines between the orthoimage and the topographic map demonstrates qualitatively the high accuracy of the rectification process. The mouth of the river Havel into the river Elbe can be seen clearly as well as the regions which have been flooded two weeks before the data acquisition. The data are used to monitor the deposition of pollutants using ground truth measurements (taking samples). With the aircraft data a map of the different sediments can be produced to facili-



Fig. 3: Mosaic of five image strips from multi-spectral scanner DAEDALUS AADS 1268 (ATM) before radiometric correction (above) and after radiometric correction (below).

tate the sampling procedure and after the analysis of the samples to generate coverage maps of the pollutant distribution and wetness classes. The data are further used in a GIS.

The second example shows the use of an aircraft image mosaic in a data fusion project to search for indications of land mine areas in Croatia. In this project rectified and mosaicked Daedalus data (7 flight strips) are used in combination with radar data to clas-

sify different surface types, especially fallow areas, to show if demining actions can be supported by these means. A classified image resulting from the use of both data sets is shown in Fig. 5. Such a classification of the image mosaic could only be successful after the radiometric homogenization of the images and the image mosaicking explained in chapter 2 and 4.

The third example, Fig. 6, is a 3D visualization of an image mosaic which requires a high resolution DEM for it's generation. The perspective view can be easily calculated when orthoimages are used. After the flood

of the river Elbe in August 2002 the City of Dresden has been covered by 15 flight stripes of the Daedalus scanner (ground resolution $1\text{ m} \times 1\text{ m}/\text{pixel}$). These data, as infrared composite, are superimposed over a laser DEM, supplied by the city authorities of Dresden for rectification purpose. Because of the high resolution DEM, the houses and trees can be seen as 3D objects. This shows that high resolution digital data are suitable for 3D visualization if the accuracy of the ortho-rectification is good enough even for high frequency height changes as the surface of a city.



Fig. 4: Part of an orthoimage mosaic (3flight stripes) of the rivers Elbe and Havel about two weeks after the heavy floodings in August 2002, integrated into a topographic map.

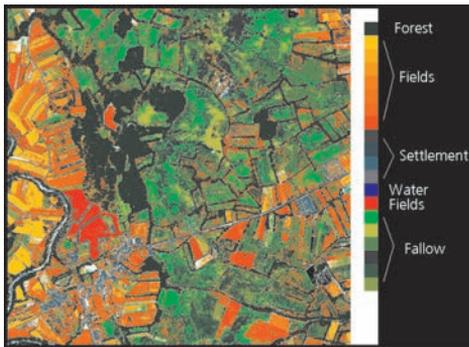


Fig. 5: Classification result with data fusion of optical (Daedalus, 3 flight strips) and radar data (E-SAR) for land mine area indication.

6 Conclusions

A mosaicking procedure is proposed which consists of three steps. First, the radiometric normalization of each individual image is

performed using image-based empirical radiometric correction method EMRACO, which corrects for sensor viewing angle effects. Then the individual images are orthorectified using IGI navigation data with the direct georeferencing software RECTIFY. Finally, the seamless mosaic is created using radiometric correction method RADMOS, which removes the between-strip radiometric variations.

The whole mosaicking procedure is fully automatic and does not require any manual user interaction.

7 Acknowledgements

We would like to thank BEATE VOLLMER for the processing of many images/mosaics and for helping in improving the method. We also like to thank the office of environment (Umweltamt) Dresden for supplying a laser DEM of the city of Dresden.



Fig. 6: Enlarged section of a 3D perspective view of the city of Dresden from ortho-rectified Daedalus images superimposed to a laser DEM. The original data set consists of 15 mosaicked flight strips. Presentation on the basis of laser scanner data, with authorization of the Land Surveying Office of Saxony. (DN V 74/02).

8 References

- AFEK, Y. & BRAND, A., 1998: Mosaicking of orthorectified aerial images. – *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* **64** (2): 115–125.
- BÄUMKER, M. & HEIMES, F.J., 2001: New Calibration and Computing Method for Direct Georeferencing of Image and Scanner Data Using the Position and Angular Data of an Hybrid Inertial Navigation System. – OEEPE Workshop on Integrated Sensor Orientation. Hannover, Germany.
- CRAMER, M. & STALLMANN, D., 2001: On the use of GPS/inertial exterior orientation parameters in airborne photogrammetry. – OEEPE Workshop on Integrated Sensor Orientation, Hannover, Germany.
- ELLUM, C.M. & EL-SHEIMY, N., 2002: Land Based Mobile Mapping System. – *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Jan. 2002, pp. 13–17.
- GRIMM, A., 2001: Results of the integrated CCNS AEROcontrol System. – OEEPE Workshop on Integrated Sensor Orientation, Hannover, Germany.
- JACOBSEN, K. & WEGMANN, H., 2001: Dependencies and Problems of Direct Sensor Orientation. – OEEPE Workshop on Integrated Sensor Orientation, Hannover, Germany.
- KENNEDY, R.E., COHEN, W.B. & TAKAO, G., 1997: Empirical methods to compensate for a view-angle-dependent brightness gradient in AVIRIS imagery. – *Remote Sensing of Environment* **62**: 277–291.
- MOSTAFA, M., 2001: Direct Georeferencing Column: An Introduction. – *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Oct. 2001, pp. 1105–1109.
- MÜLLER, Ru., LEHNER, M., REINARTZ, P. & SCHROEDER, M., 1999: Procedures for geometric rectification of airborne scanner data. – Proceedings of Workshop on Inorbit characterization of optical image systems. Bordeaux, France, 9 pages.
- MÜLLER, Ru., LEHNER, M., MÜLLER, Ra., REINARTZ, P., SCHROEDER, M. & VOLLMER, B., 2002: A program for direct georeferencing of airborne and spaceborne line scanner images. – Proceedings of ISPRS Commission I Mid-Term Symposium “Integrating Remote Sensing at the Global, Regional and Local Scale”. Denver, CO, Vol. XXXIV, Part I, Commission I.
- OLBERT, C., 1998: Atmospheric correction for *casi* data using an atmospheric radiative transfer model. – *Canadian Journal of Remote Sensing* **24**: 114–127.
- PALUBINSKAS, G., 1999: An unsupervised clustering method by entropy minimization. – In: VON DER LINDEN, W., DOSE, V., FISCHER, R. & PREUSS, R. (Eds.): *Maximum Entropy and Bayesian Methods*. – pp. 327–334, Dordrecht, Kluwer Academic.
- PALUBINSKAS, G., MÜLLER, R. & REINARTZ, P., 2002: Empirical radiometric correction of optical remote sensing imagery. – In: SHEN, S.S. & LEWIS, P.E. (Eds.): *Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery VIII*. – Proc. SPIE, Vol. 4725: 105–115.
- PALUBINSKAS, G., MÜLLER, R. & REINARTZ, P., 2003: Radiometric normalization of optical remote sensing imagery. – Proceedings of IGARSS’03 Symposium, Toulouse, France.
- RICHTER, R., MÜLLER, A. & HEIDEN, U., 2002: Aspects of operational atmospheric correction of hyperspectral imagery. – *International Journal of Remote Sensing*, **23**: 145–157.
- STAENZ, K., MEYER, P., ITTEN, K.I., GOEDENOUGH, D.G. & TEILLET, P.M., 1986: Viewing angle corrections of airborne multispectral scanner data acquired over forested surfaces. – Proceedings of IGARSS’86 Symposium. Noordwijk, The Netherlands, vol. 1, pp. 671–676.
- TAYLOR, G., 2001: Strategies for overcoming problems when mosaicking airborne scanner images. – *Earth Observation Magazine*, **10** (8): 26–31.

Addresses of the authors:

RUPERT MÜLLER, rupert.mueller@dlr.de

GINTAUTAS PALUBINSKAS,
gintautas.palubinskas@dlr.de

PETER REINARTZ, peter.reinartz@dlr.de

MANFRED SCHROEDER,
manfred.schroeder@dlr.de

VOLKER AMANN, volker.amann@dlr.de

ROLF STÄTTER
Remote Sensing Technology Institute
German Aerospace Center DLR
Oberpfaffenhofen, D-82234 Wessling

20 Years of CPNS/CCNS Operations

ROGER E. READ, Enschede, Niederlande

Keywords: history of aerial survey navigation, map production, Myanmar/Burma, CPNS, CCNS, AEROcontrol, DGPS/IMU

Summary: The first flight 20 years ago with the CPNS is remembered and the actual operation of a CCNS/AEROcontrol for map production in Myanmar is described.

Zusammenfassung: 20 Jahre Einsatz von CPNS/CCNS. Beschrieben wird der erste Flug mit dem CPNS aus 20-jähriger Rückschau sowie der aktuelle Einsatz von CCNS/AEROcontrol zur Kartenherstellung in Myanmar.

1 Remembering the First Flight

At the start of the nineteen-eighties, air survey navigation was an 'eye-ball' thing and heavily skill-related. ITC in Enschede, The Netherlands, was still involved in aerial survey crew training which involved 'ab initio' navigation students in four months of intensive lectures, up to 100 hrs nav-simulator flying and 35–40 hrs actual flight training in the Institute's Piper *Navajo Chieftain* survey aircraft. This would bring them up to a level where they would be capable of straightforward survey missions, and with an additional, basic knowledge of survey flight without maps. In addition a similar amount of time was devoted to camera, and photographic training.

ITC's survey flight crew already had extensive experience outside the institute with early VLF/Omega-, and Inertial Navigation System-based survey operations in various parts of the world, and were aware of the NavStar Global Positioning System being developed in the USA. The practical aspects of VLF/Omega and INS, (and their drawbacks), were already taught as part of the Postgraduate Diploma Course in Aerial Photography curriculum. In addition, the sparse information on NavStar was intro-

duced as it became available, and was the subject of much discussion. At that time the only survey flight management system on the market was the Litton *PICS* INS-based system pioneered by Wild Heerbrugg.

Another facet of ITC's operation was a keen interest in research into all aspects of aerial imagery. The aircraft, crew, and facilities were made available, where logistically possible, to other institutes, universities and Government agencies for equipment development and testing. Optimally, these were often combined with student training flights, with obvious, additional benefits.

Thus in 1983, a request landed on my desk, as leader of the Flight Department, that some flying time be set aside for a 'new navigation system'. The equipment would arrive on the following Tuesday morning for an afternoon test flight over the border in Germany. The aircraft was prepared, one of our standard test equipment racks readied, and the crew waited at the airport. Up until then a perfectly normal type of operation.

Two gentlemen arrived, one already known to us, a previous ITC Aerial Photography staff member (whom I had replaced in ITC) and the other carrying the first of several large cardboard boxes, and an early

computer. Our aircraft engineer took several steps back and declared, in rather typical Dutch fashion, that 'this equipment would never fly in 'his' aircraft'. The total package was brought into the workshop and more closely inspected. A full explanation followed, with appropriate 'talk and chalk', that foretold the changes in aerial survey flight management into the 21st Century. The confidence of the designers was such that we soon became believers, albeit somewhat sceptical on the flight line accuracies being predicted. We were already veterans of years of desert and jungle projects, and thus entitled to doubts.

The engineer, also having been convinced, explained that any equipment being used in an aircraft had to be slightly more than a large quantity of spaghetti-like cables, and unboxed components. Some changes were necessary. The flight would be delayed for at least twenty-four hours while the whole system was 'tidied' for flight. It was assembled on the bench and each segment examined and measured up. The engineer and assistant (myself), worked overnight and by seven-thirty am the following day the system was pronounced 'aircraft friendly'. It was then offered up to the aircraft and thoroughly tested and, with final tweaking, seen to operate, although only two of those present actually knew for sure what it was really supposed to do.

Some eight or so years ahead of the introduction of the first minimal GPS network, the Computer-controlled Photo Navigation System (*CPNS*) as it was then known, was to fly over a test area – block Sauerland – which had four portable Thomson-CSF P-DME ground stations, one at each corner. The aircraft system would interrogate each DME simultaneously to plot its actual in-flight position, and to program its onward course along flight lines and across the block, firing the camera.

By this time, the ITC crew had begun to realise that we were possibly embarking on to something rather special.

The pilot had a small monitor screen mounted on the top of the instrument panel and was to follow a VOR-style, standard

'fly-to-the-line' instrument presentation. The 'Professors' would operate the Digital Equipment computer and generally supervise the in-flight operation. I was added as an after-thought to map-read my way along the flight lines using the navigation telescope as the system showed off its paces. The engineer sat in the co-pilot seat nervously drumming his fingers.

We flew to the block although the weather conditions were far from ideal for high quality air survey. With some assistance from the Profs, the pilot found the first flight line and with an appropriately long run-in, headed towards the first picture. At this point my faith in these boxes of 'breadboard and spaghetti' may have wavered, and I was following the flight line on the map extremely carefully, although not giving any usual correction commands. The pilot closed the line on the screen, and my downward view confirmed that it was, after all, rather accurate. The system started to take pictures and we sailed along the first flight-line in amazement. By the end of the first line I was becoming somewhat relaxed, although the thought had crept into my mind that I might be looking at serious redundancy in my future career as a survey navigator!

The pilot had no trouble locating the second line and the cheerful faces all around me beamed in triumph. Their job prospects were obviously not at risk. I continued my monitoring task through the Zeiss telescope when I noticed that the aircraft was drifting off to the left somewhat. Up to now my centre line had been within a fifty metre band width, about average for a flight over hilly terrain with varying drift. Well within good medium level survey tolerance for visual navigation (as it was then I hasten to add). It continued to move off left and I was about to mention it when an anguished cry came from the pilot, 'Where's the line gone?'

I looked up and the rest of the crew's heads were busily turning frantically to look at each other, as though on the verge of panic. Then they all turned to look at me, as if it was my fault. 'Three right?' I offered.

The pilot was now back in 'our' territory, getting proper instructions that he was used

to. He kicked in some rudder in a perfectly flat ‘survey correction’ and the aircraft started to move back to the line. Maybe I wasn’t going to be out of work after all. A few more metres right and we were back within fifty metres again.

‘It’s back on again!’ shouted the pilot and the heads all craned to see the tiny screen. I relaxed but, for safety’s sake (and my reputation), kept a very close eye on the Zeiss centre line. It went off line a couple of times more, again due to thermal updrafts that were beyond the pilot’s control, and the screen image again lost the line. The block was eventually finished and PH-ITC headed back in the direction of Twente airfield. The occupants were tired but excited in their triumph. Hands were shaken, backs slapped and everyone felt that something had changed in aerial survey from that moment on.

From what I had just witnessed, I was now seriously concerned about my future career – I was still at least twenty years from retirement and too old to learn new skills.

2 Twenty Years On

Yangon, Myanmar (previously Burma), March 2003.

It is the third season of a National Mapping project to cover the whole country with 1:50 000 mapping. The prime aerial photography navigation system is a *Standard CCNS4* attached to *AEROcontrol* and IMU, and the platform a Cessna *Citation II* jet aircraft with Myanmar pilots. It is almost twenty years since we flew the very first flight of the original *CPNS* and many things are very different.



Fig. 1: Cessna *Citation II* survey aircraft.

It is now the fourth year that *CCNS4* has been in Myanmar. Its first visit being on a United Nations Drug Control Programme (UNDCP) project in January 1999, identifying and monitoring poppy fields in the Wa region on Myanmar’s north eastern border with China. The Myanmar Government have made great inroads into ‘alternative crop cultivation’ in this region, and the results showed a marked decrease in poppy plantations as a result.

The UNDCP project also served as an excellent demonstration of GPS-based survey flight management, and the Survey Department, already planning a Pilot Project to ascertain scale and method for a six-year National Mapping Project, selected *CCNS4* as its primary unit. After discussion of the complexities of the later stages of the projected survey, it was also decided that a full *CCNS4* plus *AEROcontrol-IIb* be obtained.

The previous mapping available in the country was based on surveys conducted between 1935 to 1944 by the Survey of India and the British Government Survey Department (later to become the Directorate of Overseas Survey). These maps, in one inch to the mile (1:63 360), half-inch, and quarter-inch to the mile had been reprinted over the years but with very little actual updating.

Myanmar is a large country, stretching from N 9°30’ alongside Central Thailand, to N 28° 30’ well into the Himalayas, bordering India and China. It covers 668 000 sqkm (compared to Germany’s 356 000 sqkm and France’s 544 000 sqkm), requiring some 1111 map sheets. At the time of writing, the stereo plotting for 170 maps sheets has been completed, all by the local Myanmar survey department, and local, private company staff (only one Finnish consultant has been involved on the Project on a full time basis throughout). Aerial photography coverage has been completed for 429 map sheets at the end of the 2002/2003 flying season. Actual map printing of the Pilot Project Area has been completed, and is about to start on the main production areas. The final map quality, considering constraints in budget and general facilities, is well up to European and International standards and con-

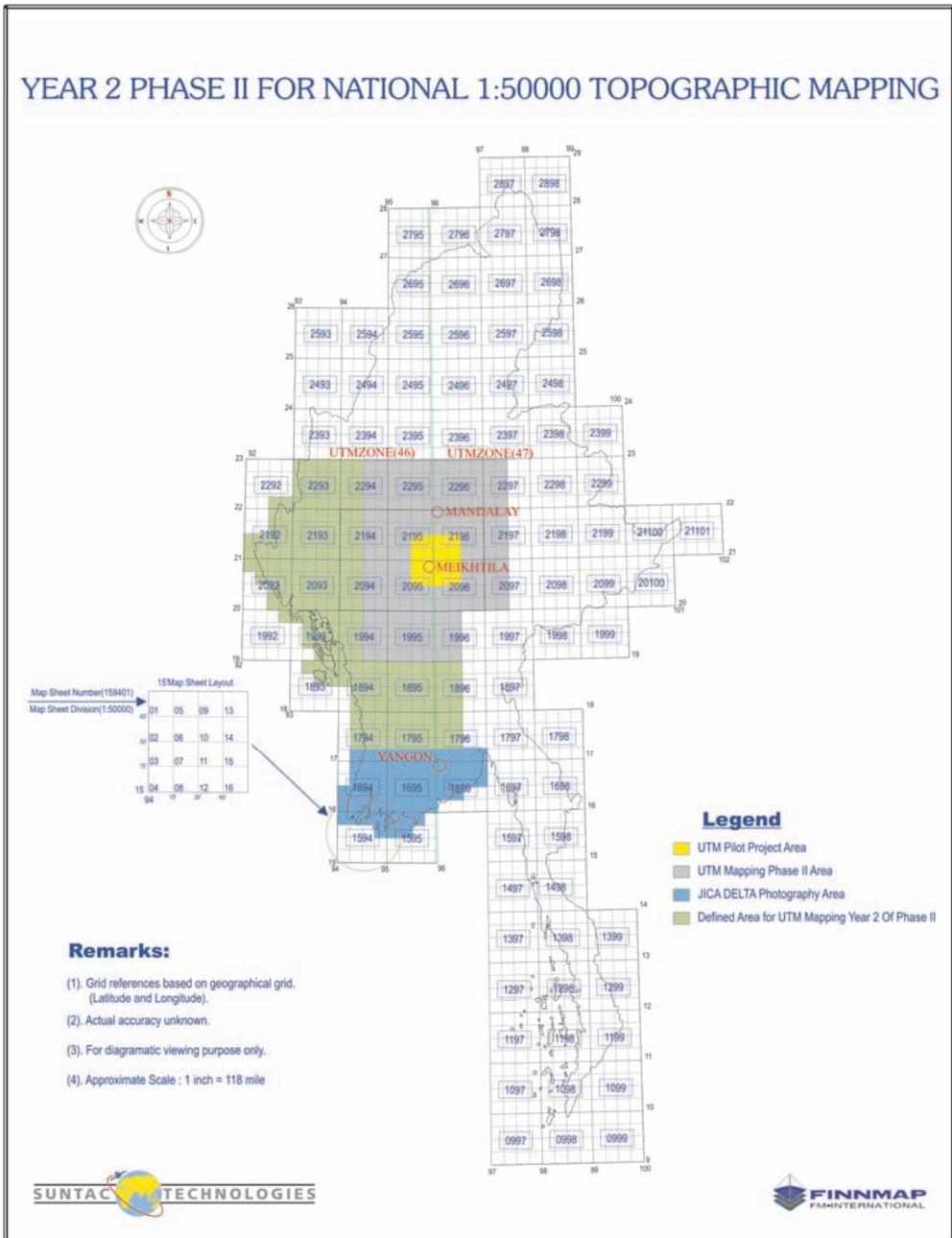


Fig. 2: Map of Myanmar with mapsheet-layout for topographic map 1:50000 and marked operation aereas.

sidered well ahead of maps produced in neighbouring countries. Quite an achievement since Myanmar is regarded as one of the world's poorest countries.

The Pilot Project was a one degree segment in the Meiktila area, south of Mandalay, and was a mixed, central plain area with mountain ridges on west and east sides. Flown at 1:25 000, this was completed in four days in January 2001. The *AEROcontrol* data was studied carefully and compared with other surveys carried out in SE Asia by FM International, Finnmap Oy, the consulting company on the project, and using normal DGPS methods.

In the 2001/2002 season the basic photo scale was changed to 1:50 000 and a further 160 map sheets flown, totally enclosed the Pilot Project area in December 2001 and January 2002. A second area was flown over the Irrawaddy Delta area comprising a further 51 sheets in February 2002. Once again, considerable study was done on the consistency and accuracy of the results against local ground control measurements, on the smaller scale material.

A more difficult area was chosen for Year II (of the main project) and ranged from the plain areas north of Yangon (Rangoon), across the wide range of mountains stretching parallel to the west coast up to the Bangladesh and India borders with terrain heights over 10000' (3050 m). The Pilot, and Year I areas were regarded as 'accessible' in that ground control from 'post-marking' was possible, there being sufficient roads in each area. Year II coverage in the northern Chin State areas was a different matter. Large areas of steep hills and valleys at between 4000' and 7000' levels, covered in forest, with few settlements and even fewer roads made ground control a virtual impossibility.

Similarly the flight operation was hampered by the lack of available airfields in the area and long transit flights consumed some 20% more flying hours than would have been needed for a similar task in Europe. The lack of available weather information is also a problem in Myanmar. The BBC World Service satellite TV channel provides a limited, but reliable picture (when avail-

able), but access to international Internet is severely controlled, although on occasions UK and French weather services can be received, although rarely. A greater hazard in the hill areas is smoke; in mid-February it is common practice to burn off the crops for next season planting and enormous areas of thick smoke make aerial photography totally impossible after 10:30 am or so. Luckily this year's programme was only affected on two occasions although additional survey work on other later programmes has been seriously curtailed as we progress into March.

So far we have completed the easy areas. From here on, the airfields get fewer, the terrain gets more inhospitable, and in some areas the potential for ground control reduces to zero. This is the reason that the *CCNS/AEROcontrol* results, and their consistency are being so carefully studied. The eastern border areas of the country are not only inaccessible for physical reasons, there are also barriers of a different nature. Large portions of these border areas are virtually war zones and completely inaccessible for surveyors and for any form of ground control. In the very north of the country, even higher terrain, up to 19000' (5880 m) with large areas above 13000' (4000), of thick forest, again with no ready access.

So far the results with *CCNS/AEROcontrol* have shown remarkable consistency and the possibility to map the totally 'inaccessible' areas to an acceptable accuracy seems highly likely. The results will continue to be analysed, and in the meantime the new, high quality, accurate, and very attractive maps are rolling off the presses after a gap of almost sixty years.

Twenty years, and several thousand hours of GPS flying after that first *CPNS* flight, I am still happy to be involved in survey flying, my fears of redundancy now far away. We imagined great things for the 'spaghetti-and-breadboards' in 1983 but the reality has exceeded those ideas a thousand fold.

References

- GRAHAM, R. W. & READ, R. E., 1986: Manual of Aerial Photography. – Focal Press, Butterworth, Sevenoaks, England.
- READ, R. E., 1983: CPNS as seen by an Air Survey Navigator. – IGI Workshop, Proceedings, Hilchenbach, pp. 48, 49.
- READ, R. E., 1983: The Aeroplane as a Camera. – The Journal of Photographic Science, **31** (5): 211–216.
- READ, R., 1985: Map makers in your air space. – FLIGHT International, 20 July, pp. 31–33.
- READ, R. E. & GRAHAM, R. W. (2002): Manual of Aerial Survey, Primary Data Acquisition. – Whittles Publishing, Caithness, UK.

Address of author:

ROGER E. READ, FRPS, FBiPP, FRSPSoc, Dip-EdTech.
Director, Aerial Imaging Systems Ltd.
Oostveenweg 126, NL-7533 VX Enschede, The Netherlands
e-mail: rojread@wxs.nl

Manuskript eingereicht: April 2003
Angenommen: Mai 2003

First Experiences with *CCNS/AEROcontrol* in China

LIANG TANG, München, LI YINGCHENG, LI XUEYOU, ZHAO JICHENG & GONG XUNPING, Beijing, China

Keywords: photogrammetry, aerial photography, Differential Global Position System (DGPS), Inertial Measurement Unit (IMU), Direct Georeferencing (DG), Integrated Sensor Orientation (ISO),

Summary: With the introduction of *CCNS/AEROcontrol* system in November 2002 the first DGPS/IMU-based photogrammetric project in China was successfully accomplished jointly by the Chinese Academy of Surveying & Mapping (CASM) and the Germany-based companies IGI and Techedge. Using the aerial camera *LKM 2000* and based on the *CCNS/AEROcontrol*, two photogrammetric blocks in Anyang, China, were flown with a photo scale of 1:4000 (for 1:1000 scale mapping) and 1:20000 (for 1:5000 scale mapping) respectively. The flight results were processed and evaluated directly after the aerial photography. After the film development and photo scanning a digital aerial triangulation was conducted for the calibration field using the China-made *GeoLord-AT* software. Based on the calibration data exterior orientation (EO) parameters of all images of the entire block were determined without using any ground control points (GCPs). Integrated sensor orientation was also conducted based on acquired DGPS/IMU data without any ground control or with a limited number of GCPs. The quality of EO parameters were proven by using many ground check points. The results are promising. The paper describes individual procedures of the project. Results are presented and evaluated. The paper concludes with further suggestions and outlook for the DGPS/IMU-based photogrammetric production in China.

Zusammenfassung: *Erste Erfahrungen mit CCNS/AEROcontrol in China.* Mit der Einführung des *CCNS/AEROcontrol* Systems im November 2002 wurde das erste DGPS/IMU-gestützte photogrammetrische Projekt in China durch eine Kooperation zwischen der Chinese Academy of Surveying and Mapping (CASM) und den deutschen Firmen IGI und Techedge erfolgreich abgeschlossen. Ausgerüstet mit der Luftbildmesskammer *LMK 2000* und unterstützt durch *CCNS/AEROcontrol* wurden zwei Blöcke jeweils für einen Bildmaßstab von 1:4000 (zur Kartenherstellung für 1:1000) und 1:20000 (zur Kartenherstellung für 1:5000) in Anyang, China, geflogen. Die Befliegungsdaten wurden direkt nach der Aufnahme verarbeitet und bewertet. Nach der Filmentwicklung und -digitalisierung wurde eine digitale Aerotriangulation über das Kalibrierungsfeld mit der chinesischen Software *GeoLord-AT* durchgeführt. Mit Hilfe der Kalibrierungsdaten wurden äußere Orientierungsparameter aller Bilder eines ganzen Blocks ohne Verwendung von Passpunkten ermittelt. Eine integrierte Sensororientierung, der die DGPS/IMU-Daten zugrunde liegen, wurde auch ohne bzw. mit Verwendung einer minimalen Anzahl von Passpunkten durchgeführt. Die Qualität der Orientierungsparameter wurde anhand von zahlreichen Geländepunkten überprüft. Die Ergebnisse sind vielversprechend. Der Beitrag beschreibt Einzelheiten über das Projekt, präsentiert und bewertet die erzielten Ergebnisse und endet mit weiteren Vorschlägen und einem Ausblick für die DGPS/IMU-gestützte photogrammetrische Produktion in China.

1 Introduction

With its opened door to the world People's Republic of China has become one of the focuses of the world economy since last two decades. Notwithstanding the current world-wide economic crisis, China's economy is booming year by year. New policies adapted for international standards since the China's entry into the World Trade Organization (WTO) attract and motivate more and more investors to China, where an even higher stage of development is to be expected in the coming future.

To bring the prosperity to a new stage the Chinese government has launched the most challenging program "Go West", aiming at developing the backward western regions, and thus, narrowing the gap of wealth to the coastal area in the east. West China is a vast, beautiful, fertile and mysterious land. It covers more than half of China's land mass and is home to 285 million people. There is full of potential for development.

The rapid development in China today demands for a higher actuality of spatial information over the whole country than ever before and raises a great challenge to the surveying and mapping community in China. There is still one-fifth of the territory (mainly in West China) without maps of 1:50000 scale, and one-third of the available maps were produced based on aerial photographs taken in the seventies and the eighties of the last century. Therefore, to speed up the map production stands in the foreground of surveying and mapping in China.

With the latest development in techniques and technologies digital processing has already replaced analytical plotting in the photogrammetric production of China. Each provincial Bureau of Surveying and Mapping is well equipped with a large number of China-made digital photogrammetric workstations (*DPWS*). Once digital or digitized images are available, the automated photogrammetric production is carried out. Automation of major photogrammetric procedures replaces the most time-consuming labor work by computers, and thus, speeds up the entire production considera-

bly. However, there are still some major obstacles to the efficiency and intensive human work is still required, e.g. photographs have to be digitized, cartographic features should be extracted, and ground control points (GCPs) must be collected and measured in the field. Image digitization can be accelerated considerably by adding some automatic mechanisms on the film scanner, or ignored completely when digital aerial cameras are applied. Feature extraction can profit a lot from *DPWS* automated functions being improved gradually with the current technical progress. Now, the task of GCP collection and measurement remains the inevitable labor work, which slows down the production directly on the one hand, and makes mapping of e.g. desert and inaccessible regions in west China very hard or even impossible on the other.

Thus, aerial photogrammetry without any ground control or with a limited number of GCPs is the prerequisite for speeding up the map production so as to meet the demands of rapid development in China and closing the map gap in the country's western regions, in particular.

2 Project "Anyang"

Direct georeferencing (DG) based on differential global positioning system (DGPS) and inertial measurement unit (IMU) technologies opens a new era of aerial photogrammetry without or with little ground control (e.g. CRAMER 2002). Latest successful applications of this kind of technology in Europe and the North America reported (e.g. KREMER 2002) encouraged the Chinese Academy of Surveying and Mapping (CASM) in Beijing, the key institution for research and engineering of the State Bureau of Surveying and Mapping (SBSM) of China, to prove and explore the applicability and the potential of this technology for mapping in China by its own.

With the successful import of a *CCNS/AEROcontrol* system (GRIMM 2003) in November 2002 CASM started the first DGPS/IMU-based photogrammetric project in China in cooperation with the Germany-ba-

Tab. 1: Anyang *CCNS/AEROcontrol* mission parameters.

| | Mission A | Mission B |
|-------------------|---|---|
| Photo scale | 1:4000 | 1:20000 |
| Map scale | 1:1000 | 1:5000 |
| Terrain type | flat | flat/hilly |
| Area | 5 km × 2.5 km | 14 km × 22 km |
| Block size | 5 strips × 18 photos | 7 strips × 16 photos |
| Calibration field | Inside the block, one more strip of 11 photos | outside the block, two strips of 11 photos each |
| Flight date | 18/11/02 19/11/02 | 03/01/03 |
| Aerial camera | Carl Zeiss Jena <i>LMK 2015</i> | |
| Airplane | <i>Yun-5</i> (made in China) | |

sed companies IGI and Techedge. Anyang, a city of Henan Province, about 500 km south of Beijing, was chosen for the test flights. Two missions of aerial photography were planned and conducted for a photo scale of 1:4000 (for 1:1000 scale mapping) and 1:20000 (for 1:5000 scale mapping) respectively. Tab. 1 shows the mission parameters.

3 Goal and Objectives

Goal of the Anyang project is to prove the applicability of *CCNS/AEROcontrol* system for topographic mapping in China and gain the first experiences thereof for all participating parties.

Major objectives of the project are:

- Installation and operation of *CCNS/AERO control* system,
- Training with *WinMP*, *GrafNav* and *AE-RO office* software,
- Training with GPS base station,
- Establishing a calibration field and conducting GPS measurements,

- Getting started with a typical *CCNS/AERO control* project to test and prove its applicability for mapping of the proposed scales,
- Performing the *CCNS/AEROcontrol*-based test flights,
- Conducting the system calibration (boresight alignment),
- Conducting GPS/IMU data post-processing,
- Conducting aerial triangulation (AT) and integrated sensor orientation (ISO),
- Comparing the GPS/IMU results with AT and ISO ones,
- Gaining the first experiences in China with:
 - How to run a *CCNS/AEROcontrol*-based project,
 - How to establish the calibration field to best fit for any kinds of applications,
 - What effects could be expected using system calibration based on different image scales,
 - How much the positioning accuracy could be influenced by the location of a GPS base station,
 - How well the GPS/IMU-based direct geo-referencing can meet the requirements for map production,
 - How much ground control points (GCPs) could be saved for the case of ISO,
 - How much time and costs could be saved for productions using GPS/IMU technologies.

4 Workflow and Procedures

Fig. 1 shows the workflow designed and actually followed for the Anyang project. Three major work phases were involved, i.e. preparation, mission and data processing. In the following, individual procedures are briefly described.

4.1 Preparation

In contrary to conventional aerial photography some additional preparation work should be done before a *CCNS/AEROcontrol* mission can be started.

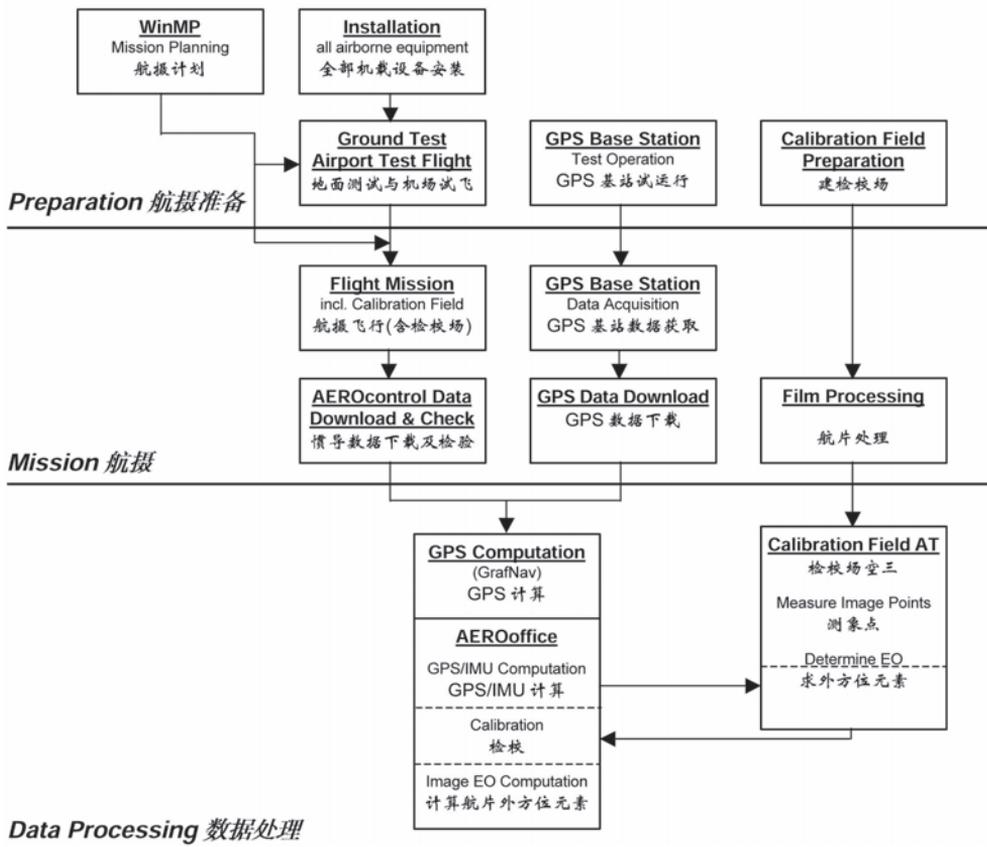


Fig. 1: Workflow of a DGPS/IMU-based photogrammetric project.

System installation and tests

In addition to aerial camera *CCNS* and *AEROcontrol* computers as well as GPS receiver have to be fixed in the aircraft. Using a camera-specific mount ring the IMU can be mounted on the aerial camera. GPS antenna should be mounted on top of the aircraft with its plummet as close to the center of camera objective as possible. Lever-arms have to be measured for later data processing. After system installation a ground test has to be conducted to check if all airborne system components work properly. If possible, an airport test flight is highly recommended e.g. before conducting a large area mission.

Mission planning

Using the *WinMP* software missions can be planned in a very comfortable way. Fig. 2 shows the *WinMP* results for the Anyang missions.

Calibration field preparation

For the so-called boresight alignment a calibration field should be established. A block of two strips of 11 photos each with a side overlap of 60% is recommended by IGI. It can be located inside or outside the mission area. Fig. 2 also shows the calibration fields designed for the Anyang missions. Six or more GCPs well distributed over the block should be measured. Signalized GCPs are

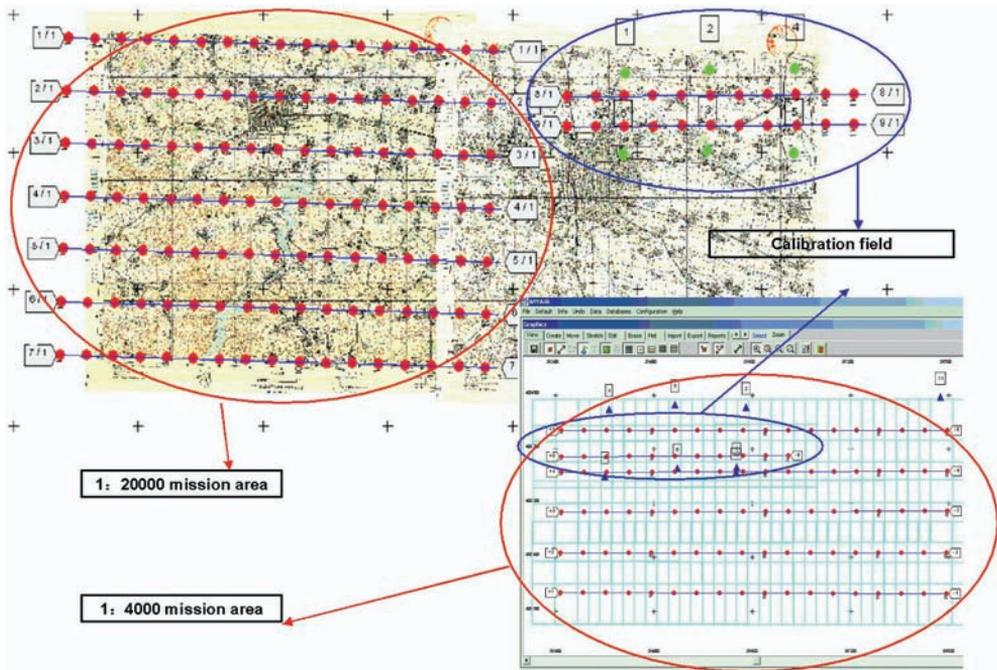


Fig. 2: Mission planning and calibration field.

desirable. However, since we wanted to gain experiences for the real photogrammetric practice in China, nature points (but one) were used only this time. Note: A calibration field is essential for DG only. An integrated sensor orientation (ISO) can completely save this additional work.

GPS base station

For DGPS measurements one GPS base or reference station is a prerequisite. Ideally it should be located within a circle of a radius of 30 km to the mission area. Concerning many special cases in China (e. g. inaccessible regions) effects of GPS base station location became one of the major objectives of the Anyang project. Thus, several GPS base stations of different distances to Anyang were simultaneously used for the missions (Fig. 3).

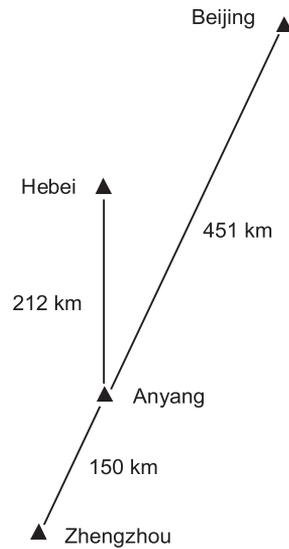


Fig. 3: Used GPS base stations.

4.2 Mission

After the preparation phase a mission can be conducted with the help of *CCNS* guidance based on *WinMP* planning. Data acquisition by *AEROcontrol* onboard and at GPS base station(s) have to be done simultaneously. After the flight all kinds of data acquired (e. g. GPS, IMU) are downloaded to the office computer and film is taken to the development. Fig. 4 shows the aircraft used for the Anyang project. GPS observation conditions for all Anyang missions can be found in Tab. 2. While the Anyang base station was used for the flight mission on November 18 (coded as A18) only, Beijing and Hebei base stations recorded data during the mission on November 19 (coded A 19) additionally. During the mission B on January 3, 2003, Beijing, Zhengzhou and Anyang base stations made data acquisition simultaneously.



Fig. 4: Yun-5 survey aircraft.

4.3 Data processing

Based on GPS and IMU data acquired during the flight positions and attitudes of the aerial photos can be determined by means of Kalman filtering (e.g. CRAMER 2002, KREMER 2002). An aerial triangulation (AT) for

Tab. 2: GPS observation conditions.

| | Mission A | | | Mission B | | |
|--------------------|----------------|--------------|------------------|----------------|----------------|------------------|
| GPS Base Station | Beijing (BJ) | Hebei (HB) | Anyang (AY) | Beijing (BJ) | Zhengzhou (ZZ) | Anyang (AY) |
| Distance to Anyang | 451 km | 212 km | – | 451 km | 150 km | – |
| Receiver Type | Thales Sagitta | Trimble 4600 | Ashtech Z-Xtreme | Thales Sagitta | Trimble 5700 | Ashtech Z-Xtreme |
| Numbers of value | 7 | 5 | 7 | 7 | 7 | 7 |
| Reliability | good | bad* | good | bad** | good | good |
| Date | 19/11/02 | | 18 & 19/11/02 | 03/01/03 | | |
| Period | about 2 hours | | | about 5 hours | | |

* Recording of P2 and D2 was not possible.

** The receiver at Beijing GPS base station was not able to record data in a long period.

Tab. 3: Boresight alignment data of two days.

| Date | Roll (deg) | Pitch (deg) | Yaw (deg) | RMS _{Roll} (deg) | RMS _{Pitch} (deg) | RMS _{Yaw} (deg) |
|----------|------------|-------------|-----------|---------------------------|----------------------------|--------------------------|
| 18/11/02 | 0.1912 | 0.3679 | 0.9379 | 0.0105 | 0.0038 | 0.0032 |
| 19/11/02 | 0.1946 | 0.3607 | 0.9412 | 0.0071 | 0.0034 | 0.0039 |



Fig. 5: Orthophoto mosaicking based on direct georeferencing.

the calibration field delivers reference data for the boresight alignment and thus, EO parameters of all photos of the block can be derived based on the calibration data. In our case we adapted the digital AT software *GeoLord-AT* (made in China) for the special task in the very short time and achieved satisfactory results. Tab. 3 shows the boresight alignment data of two days of the Anyang project.

To quickly check the quality of EO parameters determined by direct georeferencing

Tab. 4: Mode for accuracy analysis.

| Mode | Description |
|------------------|---|
| AT | Aerial Triangulation |
| DG | Direct Georeferencing based on DGPS/IMU data |
| ISO ₀ | Integrated Sensor Orientation based on DGPS/IMU data only |
| ISO ₄ | Integrated Sensor Orientation based on DGPS/IMU data and 4 GCPs |

Tab. 5: Accuracy comparisons with respect to 1 : 1000 scale mapping.

| Case | Mode | Checks point | RMS (m) | | | | Max (m) | |
|---------|------------------|--------------|------------|------------|-------------------|------------|-------------------|------------|
| | | | ΔX | ΔY | $\Delta Distance$ | ΔZ | $\Delta Distance$ | ΔZ |
| | AT* | 33/17 | 0.118 | 0.095 | 0.151 | 0.069 | 0.336 | 0.127 |
| A 18 | DG | 116 | | | 0.204 | 0.139 | 0.520 | 0.428 |
| | ISO ₀ | 47 | 0.109 | 0.086 | 0.139 | 0.105 | 0.324 | 0.241 |
| | ISO ₄ | 43 | 0.107 | 0.086 | 0.137 | 0.106 | 0.309 | 0.223 |
| | AT | 31/15 | 0.091 | 0.067 | 0.113 | 0.078 | 0.236 | 0.124 |
| A 19-AY | DG | 109 | | | 0.244 | 0.197 | 0.540 | 0.604 |
| | ISO ₀ | 45 | 0.104 | 0.082 | 0.133 | 0.078 | 0.242 | 0.177 |
| | ISO ₄ | 41 | 0.115 | 0.089 | 0.146 | 0.078 | 0.255 | 0.152 |
| A 19-HB | DG | 109 | | | 0.389 | 0.521 | 0.609 | 1.004 |
| | ISO ₀ | 45 | 0.163 | 0.335 | 0.373 | 0.419 | 0.557 | 0.553 |
| | ISO ₄ | 41 | 0.136 | 0.093 | 0.165 | 0.099 | 0.344 | 0.193 |
| A 19-BJ | DG | 109 | | | 0.291 | 0.191 | 0.475 | 0.659 |
| | ISO ₀ | 45 | 0.149 | 0.221 | 0.267 | 0.116 | 0.412 | 0.374 |
| | ISO ₄ | 41 | 0.138 | 0.095 | 0.168 | 0.114 | 0.356 | 0.238 |
| CHN-GB | | | | | 0.5 | 0.25 | 0.5** | 0.25** |

* 13 planimetric and 29 vertical ground control points were used for conventional aerial triangulation. Annotation of check points indicates "planimetric/vertical"

** value used for stereo plotting

orthophotos were generated by using a CASM own software. Fig. 5 shows an example of orthophoto mosaicking thereof. No remarkable EO parameter errors were found.

5 Results and analysis

To prove the applicability of the DGPS/IMU technology for topographic mapping in China we chose four modes for accuracy analysis (Tab. 4). Corresponding Chinese national specifications of photogrammetry for topographic mapping (cf. CHN-GB) were used as references. For missions A19 and B individual GPS base stations were treated separately. Due to some problems while data recording during the mission B data acquired at the Beijing base station was not used for the analysis. Tabs. 5 and 6 show the results of individual missions obtained by different modes. Reference values from Chinese national specifications are also given. According to the tables DG would be able to meet the accuracy requirements of direct mapping, e.g. orthophoto generation. However, there are some obvious weakness in the vertical determination. In

comparison to AT results ISO₄ delivered the best fit even for the case A19-HB, in which problems occurred at data recording (cf. Tab. 2). Even ISO₀ could improve the results considerably. An important finding would be that the distance of the GPS base station to the mission area wouldn't deteriorate the quality of orientation considerably. The results shown in Tab. 6 were obtained under deadline pressure at that time and a systematic offset in vertical direction could be seen obviously. Therefore, further investigations need to be carried out in the future.

Another important issue is the efficiency when using the new techniques. Tab. 7 gives the schedule for the mission A from system installation to orthophoto generation this time. Since there was a lot of time spent for new system training, aircraft montage strategies and GCP measurements more efficiency could be expected in the future.

Since the blocks of the Anyang project were too small to find out a real statement about the cost in both time and money, we can only estimate a number of about 25 % saving in both time and money based on our tests this time.

Tab. 6: Accuracy comparisons with respect to 1 : 5000 scale mapping.

| Case | Mode | Checks point | RMS (m) | | | | Max (m) | |
|--------|------------------|--------------|------------|------------|--------------------------|------------|--------------------------|------------|
| | | | ΔX | ΔY | $\Delta \text{Distance}$ | ΔZ | $\Delta \text{Distance}$ | ΔZ |
| B-AY | AT* | 20/8 | 0.625 | 0.737 | 0.966 | 0.234 | 1.618 | 0.381 |
| | DG | 88 | | | 0.984 | 1.330 | 2.327 | 2.592 |
| | ISO ₀ | 32 | 0.578 | 0.535 | 0.787 | 0.981 | 1.403 | 1.797 |
| | ISO ₄ | 28 | 0.707 | 0.623 | 0.942 | 0.535 | 1.724 | 0.975 |
| B-ZZ | DG | 88 | | | 0.988 | 1.035 | 2.188 | 2.616 |
| | ISO ₀ | 32 | 0.496 | 0.610 | 0.786 | 0.820 | 1.575 | 1.667 |
| | ISO ₄ | 28 | 0.672 | 0.604 | 0.903 | 0.874 | 1.738 | 1.714 |
| CHN-GB | | | | | 1.75 | 1.0 | 1.75** | 1.0** |

* 13 planimetric and 16 vertical ground control points were used for conventional aerial triangulation. Annotation of check points indicates "planimetric/vertical"

** value used for stereo plotting

Tab. 7: Schedule of the Anyang Mission A: From system installation to orthophoto generation.

| Date | Place | Main events and actions |
|---------|-------------------|--|
| Nov. 16 | Beijing Anyang | <ul style="list-style-type: none"> • About 5 hours drive from Beijing to Anyang and arrival in Anyang at 13:30 • Preparation for system installation in the aircraft • <i>WinMP</i>, <i>CCNS</i> training |
| Nov. 17 | Anyang | <ul style="list-style-type: none"> • Airborne equipment installation and ground test • GPS base station training and test operation • <i>WinMP</i>, <i>CCNS</i> pilot training • Calibration field preparation (GPS measurement) |
| Nov. 18 | Anyang | <ul style="list-style-type: none"> • Flight mission • <i>GrafNav</i> and <i>AEROoffice</i> training and mission data processing • Film transportation to Beijing |
| Nov. 19 | Anyang Beijing | <ul style="list-style-type: none"> • Flight mission • <i>GrafNav</i> and <i>AEROoffice</i> training and mission data processing • Back to Beijing |
| Nov. 20 | Beijing | <ul style="list-style-type: none"> • Film development and scanning • <i>AEROoffice</i> training and mission data processing • <i>GeoLord-AT</i> software adaptation for DGPS/IMU data handling |
| Nov. 21 | Beijing | <ul style="list-style-type: none"> • AT of calibration field, boresight alignment and AT program adaptation • <i>AEROoffice</i> training |
| Nov. 22 | Beijing | <ul style="list-style-type: none"> • AT of calibration field, boresight alignment and AT program adaptation • <i>AEROoffice</i> training and direct georeferencing of block A 18 • Orthophoto generation and mosaicking based on DG |

6 Conclusions and outlook

Our first experiences described proved the applicability of the *CCNS/AEROcontrol* system for topographic mapping in China. According to our findings this time direct georeferencing would be suitable for direct orthophoto generation even of large scales. Integrated sensor orientation using a limited number of ground control points can compensate some systematic errors and makes the best way to replace the conventional aerial triangulation. For small scale mapping direct georeferencing should be good enough to meet the accuracy requirements.

Further investigations on the DGPS/IMU technology are planned in order to collect enough first-hand material e.g. to work out the corresponding National Standards and Specifications. We can now expect that this new technology will find a wide variety of applications in China soon.

Using digital aerial camera and airborne laser scanner (LIDAR) mounted on a

unique platform supported by DGPS/IMU technology and making use of the global DGPS networks (e.g. GAO et al. 2002) it is to be expected in the near future that spatial information would be deliverable within 24 hours from its acquisition (TANG 2004).

Acknowledgements

The authors would like to thank Prof. ALBRECHT GRIMM, HELMUT KOHLHAAS and Dr. JENS KREMER of IGI and all members of the CASM team for the nice atmosphere and the kind and fruitful cooperation.

References

- CHN-GB:
 GB 6962-86
 Specifications of aerial photography for 1 : 500, 1 : 1000, 1 : 2000 scale topographical mapping
 GB 7930-87
 Specifications of photogrammetric processing (indoor) for 1 : 500, 1 : 1000, 1 : 2000 scale topographical mapping

- GB 7931-87
Specifications of photogrammetric field work (outdoor) for 1:500, 1:1000, 1:2000 scale topographical mapping
- GB/T 15661-1995
Specifications of aerial photography for 1:5000, 1:10000 scale topographical mapping
- GB/T 13990-92
Specifications of photogrammetric processing (indoor) for 1:5000, 1:10000 scale topographical mapping
- GB/T 13977-92
Specifications of photogrammetric field work (outdoor) for 1:5000, 1:10000 scale topographical mapping
- GB/T 18314-2001
Specifications of GPS measurements
- CRAMER, M., 2002: Experiences on operational GPS/inertial system calibration in airborne photogrammetry. – GIS – Geoinformationssysteme, **14** (6): 37–42, Wichmann Verlag, Heidelberg, Germany.
- GAO, Y., SHEN, X. & Abdel-Salam, M., 2002: Global Differential GPS Positioning without Using a Base Station. – Geographic Information Sciences, Vol. 8, No. 1: 9–15.
- GRIMM, A., 2003: 25 Jahre IGI, die Entwicklung von CCNS und AEROcontrol. – Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation (PFG), **2003** (4): 245–258.
- KREMER, J., 2002: CCNS/AEROcontrol – an Integrated GPS/Inertial System for Direct Georeferencing of Airborne Image Data. – Symposium Gyro Technology 2002, Stuttgart, Germany, pp. 16.0–16.9.
- TANG, L., 2004: Spatial information from acquisition to delivery within 24 hours: A dream or a reality? – Accepted for Proceedings of the 4th International Symposium on Mobile Mapping Technology, Kunming, China, March 29–31, 2004.

Address of authors:

Dr. LIANG TANG
Techedge GmbH Consulting & Software
Herzog-Maximilian-Weg 2, D-85551 Kirchheim
Tel.: 49-89-99020272, Fax: 49-89-99020274
e-mail: tang@techedge.de

Prof. LI YINGCHENG, M.Sc.
LI XUEYOU, M.Sc.
Prof. ZHAO JICHENG
Prof. GONG XUNPING
Chinese Academy of Surveying & Mapping
16 Beitaping Road, Haidian District
Beijing 100039, P.R. of China
Tel.: 86-10-68289694, Fax: 86-10-68160588
e-mail: casmphrs@public3.bta.net.cn

Manuskript eingereicht: April 2003
Angenommen: Mai 2003

Permanente GPS-Stationen als Referenz für präzise kinematische Positionierung

LAMBERT WANNINGER, Neuwied

Keywords: GPS, reference station, kinematic positioning, observation interpolation, virtual reference station

Zusammenfassung: Die beim Einsatz permanenter GPS-Referenzstationen für präzise kinematische Positionierung auftretenden Probleme werden beschrieben und Lösungen vorgestellt. Dazu gehören die zeitliche Verdichtung von Referenzstationsbeobachtungen und die Positionierung im Netz von Stationen mit Hilfe einer semikinematischen virtuellen Referenzstation.

Summary: *Continuously Operating GPS Reference Stations for Precise Kinematic Positioning.* The paper describes difficulties encountered using continuously operating GPS reference stations for precise kinematic positioning and shows how to resolve these problems. This includes the production of high-rate reference observations by interpolation and the positioning in a network of reference stations using a semi-kinematic virtual reference station.

Einleitung

GPS ist heutzutage bei der präzisen Positionierung Flugzeug-getragener Sensoren wie Luftbildkamera oder Laserscanner unverzichtbar. Um die für viele Anwendungen erforderlichen Positionierungsgenauigkeiten auf Dezimeter- oder sogar Zentimeterniveau zu erreichen, müssen GPS-Referenzstationen am Boden betrieben werden. Durch die schnell zunehmende Ausbreitung permanenter GPS-Referenzstationen besteht immer mehr die Möglichkeit, dabei auf den Betrieb zusätzlicher temporärer Referenzstationen zu verzichten. Dabei spielen die zeitliche Verdichtung der Referenzbeobachtungen und die Positionierung im Netz von Referenzstationen eine wichtige Rolle.

Permanente GPS-Referenzstationen in Europa

Weltweit sind seit 1992 permanent betriebene GPS-Stationen im Aufbau, die Referenz-

daten für präzise Positionierung und auch für andere Aufgabenstellungen bereitstellen. Augenblicklich (März 2003) existieren in Europa etwa 650 permanente Stationen, deren Daten für *Post-Processing*-Anwendungen erhältlich sind. Die in Abb. 1 dargestellten Stationen wurden anhand der im Internet verfügbaren Informationen zusammengetragen. Da es eine unüberschaubare Anzahl von Stationsbetreibern gibt, ist die Darstellung sicherlich nicht vollständig.

Auf allen diesen Referenzstationen werden hochwertige Zweifrequenz-Empfänger betrieben und geodätische Antennen eingesetzt. Die meisten Stationen sind reine GPS-Stationen, auf einigen werden kombinierte GPS/GLONASS-Empfänger eingesetzt. Im Allgemeinen liegen Stationskoordinaten im ITRF 2000 oder ETRS 89 vor. Die Daten werden im RINEX-Datenformat (GURTNER 2002) gespeichert. Es existiert eine Reihe weiterer Stationen, die nur für den Echtzeitbetrieb arbeiten, also ihre Referenzdaten aussenden, ohne sie für nachträgliche Nut-

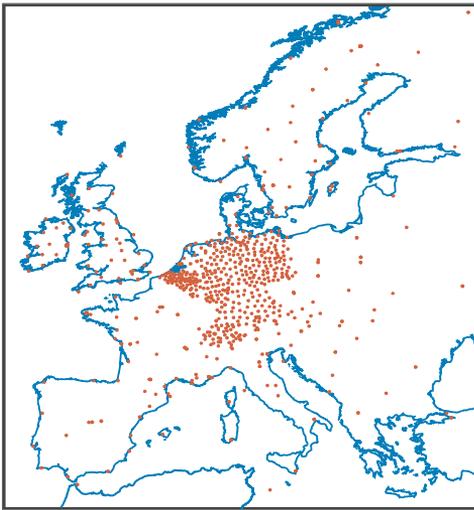


Abb. 1: Permanente GPS-Referenzstationen in Europa, deren Beobachtungsdaten für nachträgliche Nutzung zur Verfügung stehen (Stand März 2003).

zung abzuspeichern oder zur Verfügung zu stellen. Solche Stationen wurden in Abb. 1 nicht aufgenommen.

Betreiber der Stationen sind Forschungseinrichtungen, nationale Landesvermessungsämter oder private Firmen. Die Daten vieler dieser Stationen werden dem Nutzer kostenlos zur Verfügung gestellt. Dies gilt insbesondere für die im Rahmen internationaler Forschungsk Kooperationen gesammelten Daten des *International GPS Service* (IGS 2003), des *International GLONASS Service Pilot Project* (IGLOS 2003), für den kombinierte GPS/GLONASS-Empfänger betrieben werden, und des *EUREF Permanent Network* (EPN 2003) und zum Teil auch für Referenzdaten nationaler Landesvermessungsämter.

Der Rückgriff auf Referenzdaten von permanenten GPS-Stationen ermöglicht den Verzicht auf den Betrieb eigener temporärer Referenzstationen für die Dauer einer Messkampagne. Die Kosten für den Einkauf von Referenzdaten liegen in jedem Fall weit unter den Kosten für den Betrieb einer eigenen Station. Die Betreiber permanenter Stationen geben aber keine Garantie, dass ihre Stationen tatsächlich in jedem Zeitraum

Referenzdaten liefern. Zwar ist die Verfügbarkeit der Referenzstationsdaten im allgemeinen sehr hoch, aber es existieren große Unterschiede zwischen einzelnen Stationen bzw. Stationsbetreibern. In einigen Teilen Europas sind die Netze dicht genug, um im Falle eines Stationsausfalls auf die Daten einer benachbarten Station zurückgreifen zu können.

Die größte Dichte von permanenten Referenzstationen findet sich in einigen Staaten Zentraleuropas. Der Stationsabstand beträgt hier zum Teil nur 20 bis 50 km. Zielsetzung ist es hier, zentimeter-genaue Positionierung mit sehr kurzen Beobachtungszeiten zu ermöglichen. Wie die Erfahrungen der letzten Jahre zeigen, ist dafür ein Referenzstationsabstand von 50 km vollkommen ausreichend, wenn die Positionierung im Referenzstationsnetz und nicht nur in Bezug auf eine einzelne Referenzstation durchgeführt wird. Zu diesem Zweck werden die Beobachtungsdaten des Referenzstationsnetzes vorverarbeitet, es werden präzise Korrekturmodelle der entfernungsabhängig wirkenden Fehlereinflüsse berechnet und ein für den Aufenthaltsort des Nutzers optimaler Referenzdatensatz einer sogenannten virtuellen Referenzstation (VRS) erzeugt (WANNINGER 1999, WÜBBENA et al. 2000, LANDAU 2000).

Für die meisten Referenzstationen werden die Beobachtungsdaten mit einem Epochenabstand von größer als einer Sekunde angeboten. Typische Epochenabstände sind 15 oder 30 Sekunden. Für kinematische Anwendungen sind Beobachtungen der Referenzstation aber mit derselben Häufigkeit notwendig, wie sie im bewegten Empfänger aufgezeichnet werden, also mit einem Epochenabstand von einer Sekunde oder sogar noch dichter. Eine Verringerung des Epochenabstands gelingt ohne bedeutende Genauigkeitsverluste durch zeitliche Interpolation zwischen Referenzstationsbeobachtungen.

Zeitliche Verdichtung von Referenzstationsbeobachtungen

Seit der Abschaltung der künstlichen GPS-Signalverschlechterung durch *Selective*

Availability im Mai 2000 ist die Verdichtung von statischen Referenzbeobachtungen zur Verringerung des Epochenabstands kaum noch mit Genauigkeitsverlusten verbunden. Problemlos können die Beobachtungen statischer Referenzstationen, die z. B. mit einem Epochenabstand von 15 oder 30 Sekunden vorliegen, auf Epochenabstände von einer Sekunde oder weniger als einer Sekunde verdichtet werden, um dann für die Relativauswertung kinematischer Beobachtungsdaten zur Verfügung zu stehen (WANNINGER 2000).

Die Größenordnung der dabei auftretenden Interpolationsfehler soll anhand eines Beispieldatensatzes aufgezeigt werden. Von vier GPS-Empfängern liegen mehrere Stunden Beobachtungsdaten vor, die mit einem Epochenabstand von einer Sekunde aufgezeichnet wurden. Es wurden hierbei statisch betriebene Empfänger gewählt, um Sollkoordinaten zur Verfügung zu haben. Die erzielten Ergebnisse gelten aber genauso für kinematische Anwendungen. Die Basislinienlängen zwischen einer gewählten Referenzstation und den drei weiteren Stationen betragen 7, 98 und 165 km. Um größere Epochenabstände zu simulieren, wurden die Daten der Referenzstationen durch Beobachtungsselektion auf unterschiedliche Intervalle ausgedünnt. Anschließend wurden die verbliebenen Referenzbeobachtungen durch Interpolation mit Hilfe des Programms WARINEX wieder auf einen Epochenabstand von einer Sekunde verdichtet. Abb. 2 zeigt die räumliche Positionsgenauigkeit von Einzelepochen im Sekundenabstand in Abhän-

gigkeit des ursprünglichen Ausdünnungsintervalls, der Basislinienlänge und der Art der Koordinatenlösung.

Die Ergebnisse der Abb. 2 lassen sich wie folgt interpretieren: Die mit den Originaldaten erzielbare Positionsgenauigkeit ist abhängig von der Basislinienlänge. Je größer der Abstand zwischen den Stationen, umso stärker wirken die entfernungsabhängigen Fehlereinflüsse und umso größer wird die Standardabweichung der 3D-Position. Gelingt die vollständige Zweifrequenz-Mehrdeutigkeitslösung, erzielt man mit der Ionosphären-freien Koordinatenlösung die besten Ergebnisse mit Standardabweichungen von wenigen Zentimetern. Bei längeren Basislinienlängen kann es aber vorkommen, dass nur die Widelan-Mehrdeutigkeitslösungen auf ihre ganzen Werte festgesetzt werden können, so dass dann nur eine Widelan-Koordinatenlösung möglich ist, die verstärkt durch Mehrwegefehler und Ionosphäre beeinflusst wird. Die erzielbaren Positionsgenauigkeiten liegen dann bei diesen statischen Beobachtungen im 10 cm-Niveau.

Verdichtet man nun Referenzbeobachtungen, um den Epochenabstand der kinematischen Beobachtungen zu erhalten, so werden zusätzlich Interpolationsfehler gemacht. Die Ergebnisse in Abb. 2 zeigen aber, dass diese vielfach so gering sind, dass sie keinen Einfluss auf die Koordinatenergebnisse haben. Bis zu einem Ausdünnungsintervall von 10 Sekunden für die kürzeste und 20 Sekunden für die längste Basislinie sind keine signifikanten Verschlechterungen der Koordinatengenauigkeiten nachweisbar.

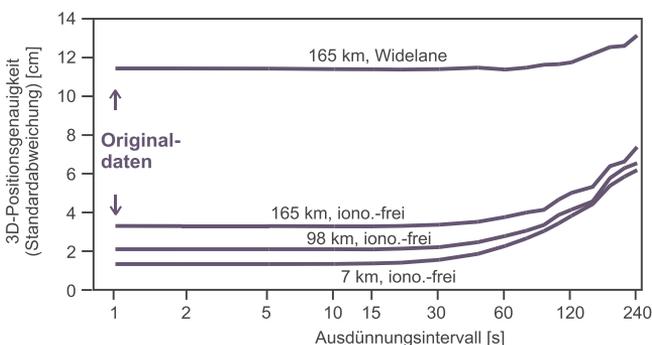


Abb. 2: Dreidimensionale Positionsgenauigkeit von Einzelepochen bei zeitlich verdichteten Referenzbeobachtungen.

Akzeptiert man eine 10-prozentige Genauigkeitsverschlechterung gegenüber der Originallösung, so sind Ausdünnungsintervalle von 20 Sekunden (Ionosphären-freie Koordinatenlösung bei 7 km Basislinienlänge), 30 Sekunden (Iono.-frei bei 98 km), 45 Sekunden (Iono.-frei bei 165 km) bzw. 180 Sekunden (Widelane-Koordinatenlösung bei 165 km) zulässig.

Positionierung in Referenzstationsnetzen

Wie ausgeführt, eignen sich alle permanenten GPS-Referenzstationen auch für die präzise Positionierung kinematischer GPS-Beobachtungen, wie z. B. Fluganwendungen. Optimale Ergebnisse erhält man, wenn nicht nur die nächstgelegene GPS-Station als Referenz verwendet wird, sondern alle umliegenden Referenzstationen als Netz betrachtet und deren Daten vorverarbeitet werden.

Dabei werden im Netz der Referenzstationen präzise Korrekturmodelle für die entfernungsabhängig wirkenden Einflüsse der Ionosphäre, Troposphäre und GPS-Satellitenorbitfehler geschätzt und zur Erzeugung von virtuellen Referenzdaten verwendet. Für großräumige Anwendungen müssen die Daten der Virtuellen Referenzstation (VRS) folgende Eigenschaften aufweisen: Zum einen muss die VRS der sich zeitlich ändernden Position des bewegten Empfängers folgen, um möglichst dieselben Fehlereinflüsse aufzuweisen, die dann bei relativer Positionierung herausfallen. Zum anderen muss sie sich aber auch auf eine feste Position beziehen, um von den heute üblichen Auswertesoftwarepaketen als Referenzstation akzeptiert zu werden. Eine solche VRS für großräumige kinematische Auswertungen wird als semi-kinematische VRS bezeichnet (WANNINGER 2002).

Am Beispiel des photogrammetrischen Testprojekts Peebles in Schottland sollen die Vorteile der GPS-Positionierung im Netz von Referenzstationen mit Hilfe einer semi-kinematischen VRS im Vergleich zur Positionierung in Bezug auf eine einzelne Refe-

renzstation aufgezeigt werden. Im Flugzeug wurde das GPS/INS-System AEROcontrol der IGI mbH, Kreuztal verwendet. Die folgenden Ausführungen beziehen sich aber ausschließlich auf die GPS-Komponente. Als Referenzstationen am Boden wurde auf Stationen des *National GPS Network* des britischen *Ordnance Survey* zurückgegriffen, deren Beobachtungsdaten im Internet zur Verfügung stehen (OS 2003).

Bei Verwendung einer einzelnen Referenzstation zur Auswertung der Peebles-Flugdaten würde man die zentral gelegene Station EDIN (Edinburgh) auswählen (Abb. 3). Die maximale Distanz zum Flugzeug beträgt dann 100 km (Abb. 4). Alternativ könnte man die jeweils nächste Referenzstation verwenden, also den Gesamtflug in mehreren unabhängigen Abschnitten auswerten. Dies erhöht den Aufwand für die Datenorganisation aber beträchtlich. Arbeitet man mit einer semi-kinematischen VRS, so werden alle Referenzstationsdaten des Gebietes (vgl. Abb. 3) gemeinsam vorverarbeitet und ein optimaler Referenzstationsdatensatz erzeugt.

Hierfür wurden mit WaSoft/Virtuell zunächst Näherungskordinaten für die Flugzeug-Trajektorie als Einzelstationspositionierung bestimmt. Für die Beobachtungsdaten der fünf Stationen des Referenzstationsnetzes wurden die Phasenmehrdeutigkeiten vollständig gelöst und anschließend präzise Korrekturmodelle der entfernungsabhängigen Fehlereinflüsse (Ionosphäre, Troposphäre und Orbitfehler) berechnet. Die Referenzdaten der Station EDIN wurden dann mit Hilfe der Korrekturmodelle und der Näherungspositionen des Flugzeuges so verändert, dass Beobachtungsdaten einer semikinematischen VRS entstanden. Als feste Referenzposition der VRS wurden die Koordinaten von EDIN gewählt. Sie hätte aber auch an einem beliebigen anderen Ort am Boden fixiert werden können. Da die Referenzdaten der Bodenstationen mit einem Epochenabstand von nur 15 Sekunden vorlagen, wurden für den folgenden Vergleich Beobachtungen von EDIN und auch der VRS durch zeitliche Interpolation auf eine Sekunde verdichtet.

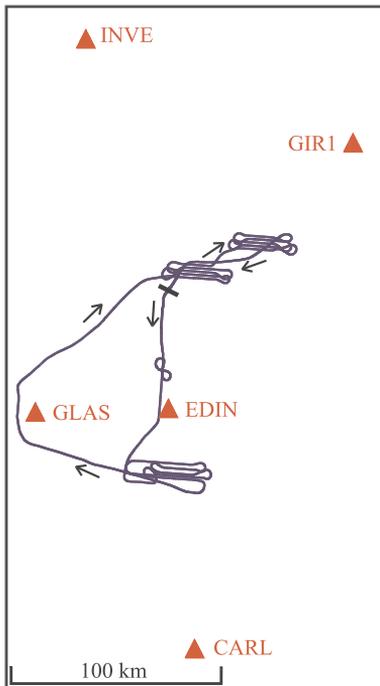


Abb. 3: Permanente GPS-Referenzstationen und Flugtrajektorie im Projekt Peebles.

Ein Qualitätsvergleich der Flugzeug-Positionierung mit Hilfe der einzelnen Referenzstation EDIN und einer semi-kinematischen VRS basierend auf fünf Referenzstationen gelingt über die Betrachtung der Einzelepochen-Residuen. Doppel-Differenz-Residuen der L1-Phasenbeobachtungen und der Ionosphären-freien Linearkombination aus Zweifrequenz-Messungen sind in Abb. 4 dargestellt. Die L1-Residuen werden von ionosphärischen Einflüssen dominiert. Diese können durch Verwendung der semi-kinematischen VRS fast halbiert werden, also die ionosphärisch bedingten Fehler deutlich reduziert werden. Die Restfehler in der Ionosphären-freien Linearkombination ergeben sich insbesondere aus Mehrwegeeffekten sowie troposphärischen und Orbitfehler-Einflüssen. Hier gelingt im Referenzstationsnetz eine Verringerung der horizontalen troposphärischen Einflüsse und auch der Orbitfehler. Da diese aber nur wenig zum Gesamtfehlerhaushalt beitragen, fallen die Verbesserungen hier gering aus.

Die Verwendung der semi-kinematischen VRS verbessert also eine Ionosphären-freie Koordinatenlösung nur wenig. Durch die Verringerung der ionosphärischen Restfehler ermöglicht sie aber eine vollständigere und zuverlässigere Festsetzung der Phasenmehrdigkeiten. Dieser Vorteil kommt bei den vorliegenden Daten kaum zum Tragen, da über die Flugdauer von 3,7 Stunden fast keine Signalabbrüche aufgetreten sind. Bei Bildflügen können diese aber insbesondere in den Kurven zwischen den Bildstreifen kontinuierliche Phasenmessungen verhindern. Um eine solche Situation zu simulieren wurden die Daten des gesamten Fluges in 44 Teilstücke von jeweils 5 Minuten Dauer aufgeteilt. Die Auswertung mit WaSoft/K ergab korrekte Mehrdeutigkeitslösungen bei Verwendung der Referenzstation EDIN in 54 % aller Fälle. Dies konnte bei Verwendung der semi-kinematischen VRS auf 91 % gesteigert werden. Die Verringerung der ionosphärischen Einflüsse führt hier also zu einer deutlichen Verbesserung der Positionierung.

Gelingt die vollständige Zweifrequenz-Mehrdigkeitenlösung nicht, aber zumindest die Festsetzung der Widelane-Mehrdigkeiten, so wird häufig auf eine Widelane-Koordinatenlösung zurückgegriffen, die aber durch ionosphärische Restfehler beeinflusst wird. Im Beispielesatz beträgt die Koordinatengenauigkeit einer Widelane-Lösung (im Vergleich zur Ionosphären-freien Koordinatenlösung) bei Verwendung von EDIN 5,3/6,4/13,0 cm (Standardabweichungen in Nord/Ost/Höhe). Durch Einsatz der semi-kinematischen VRS verringern sich die Werte auf 2,4/3,0/7,8 cm. Die Korrektur der ionosphärischen Fehler im Referenzstationsnetz hat hier also eine deutliche Steigerung der Positionierungsgenauigkeit zur Folge.

Schlussfolgerungen

Die große Anzahl permanenter GPS-Referenzstationen macht in vielen Regionen den Betrieb eigener Referenzstationen überflüssig. Die Beobachtungsdaten der permanenten GPS-Referenzstationen können selbst

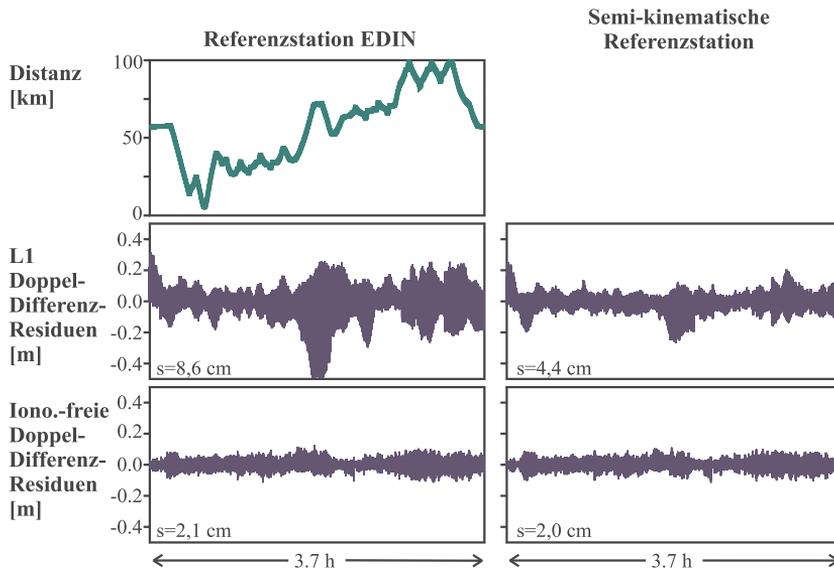


Abb. 4: Vergleich der Basislinienlösungen mit Hilfe der Referenzstation EDIN und der semi-kinematischen VRS: Distanz Referenzstation – Flugzeug, Doppel-Differenz-Residuen für L1 und die Ionosphären-freie Linearkombination.

dann für die präzise Positionierung Flugzeug-getragener Sensoren verwendet werden, wenn sie mit einem großen Messepochenabstand aufgezeichnet wurden. Optimale Positionierungsergebnisse erhält man, wenn die Beobachtungsdaten mehrerer über das Einsatzgebiet verteilter GPS-Stationen vorverarbeitet werden und in der Form einer Virtuellen Referenzstation (VRS) in die Auswertung einfließen.

Literatur und Internetquellen

EPN, 2003: <http://www.epncb.oma.be>

GURTNER, W., 2002: RINEX: The Receiver Independent Exchange Format Version 2.10. – Astronomisches Institut, Universität Bern, <http://igsb.jpl.nasa.gov/igsb/data/format/rinex210.txt>

IGLOS, 2003: <http://igsb.jpl.nasa.gov/projects/iglos/glonass.html>

IGS, 2003: <http://igsb.jpl.nasa.gov/>

LANDAU, H., 2000: Die Implementierung des „virtuellen Referenzstationskonzeptes“ für die RTK-Vermessung mit GPS und GLONASS. – 3. SAPOS-Symposium, 88–89, München 2000. http://www.sapos.de/pdf/3symposium/SAPOS_V11.pdf

OS, 2003: <http://www.gps.gov.uk/>

WANNINGER, L., 1999: Präzise Positionierung in regionalen GPS-Referenzstationsnetzen. Deutsche Geodätische Kommission, Heft C508, München 2000. <http://www.wasoft.de/lit/wanhabil.zip>

WANNINGER, L., 2000: Interpolation von GPS-Beobachtungen. Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), **107**: 360–363.

WANNINGER, L., 2002: Virtual Reference Stations for Centimeter-Level Kinematic Positioning. – Proc. of ION GPS 2002, Portland, Oregon, 1400–1407. <http://www.wasoft.de/lit/ion02f36.pdf>

WÜBBENA, G., BAGGE, A. & SCHMITZ, M., 2000: Referenzstationsnetze und internationale Standards. 3. SAPOS-Symposium, 14–23, München 2000. http://www.sapos.de/pdf/3symposium/SAPOS_V03.pdf

Anschrift des Autors:

Dr.-Ing. LAMBERT WANNINGER
Ingenieurbüro Wanninger
Melsbacher Str. 2, D-56567 Neuwied
Tel./Fax: 02631-951698
e-mail wanninger@wasoft.de
<http://www.wasoft.de>

Manuskript eingereicht: April 2003

Angenommen: Mai 2003

Berichte

2. Oldenburger 3D-Tage Optische 3D-Messtechnik – Photogrammetrie – Laser-Scanning

27./28. Februar 2003

Mit den 2. Oldenburger 3D-Tagen wurde an der Fachhochschule Oldenburg nach der Auftaktveranstaltung im vergangenen Jahr eine weitere erfolgreiche Tagung um den Themenkomplex der 3D-Objekterfassung und Modellierung durchgeführt. Ausgerichtet wurde die Veranstaltung von den Instituten für Angewandte Photogrammetrie und Geoinformatik (IAPG) und für Mess- und Auswertetechnik (IMA) der FH Oldenburg sowie der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation (DGPF). Unter der Gesamtüberschrift *Optische 3D-Messtechnik – Photogrammetrie – Laser-Scanning* wurde in 30 Vorträgen ein umfassendes Bild der aktuellen und zukünftigen Entwicklung auf dem Gebiet der 3D-Erfassung gezeichnet. Die gegenüber der 1. Veranstaltung im Jahre 2002 vorgenommene Erweiterung des Themenkomplexes um die Optische 3D-Messtechnik stellt nicht nur eine sinnvolle thematische Ergänzung und Komplettierung dar. Eine Gesamtbetrachtung dieser drei konkurrierenden Verfahren ist auch deshalb sinnvoll, weil nach der Auftakteuphorie im Bereich Laser-Scanning eine Einordnung in alternative Verfahren zur 3D-Objekterfassung dringend geboten ist.

Folgerichtig wurde mit dem Eröffnungsvortrag unter dem Titel *Segmentation, Rekonstruktion und Datenfusion bei der Objekterfassung aus Entfernungsdaten – ein Überblick* ein Thema gewählt, das bei allen Erfassungssensoren eine zentrale Rolle einnimmt und bei dem unverändert großer Forschungsbedarf besteht. Hier wurden wie in den anderen Vorträgen zum Thema Datenmodellierung neueste Forschungsergebnisse und zukünftige Entwicklungen präsentiert. Insbesondere beim Laser-Scanning sind weitere Entwicklungen zur Datenmodellie-

rung erforderlich, besteht doch noch immer ein deutliches Missverhältnis zwischen der schnellen Datenaufnahme vor Ort und den langen Auswertezeiten der Objektmodellierung. Das Verhältnis hat sich zwar von anfänglich ca. 1:10 auf heute ca. 1:4 verbessert, ist aber für viele Anwender immer noch zu hoch.

Anhand der vielfältigen, thematisch breit gestreuten Praxisbeispiele konnte demonstriert werden, dass sich das Laser-Scanning zu einem Standardverfahren der Ingenieurvermessung entwickelt und mittlerweile in Konkurrenz zu geodätischen und photogrammetrischen Verfahren treten kann. Neben diesen Potenzialen sind aber auch die (systembedingten) Schwächen des Verfahrens von einigen Anwendern aufgezeigt worden. Diese treten immer dann auf, sobald ungünstige Messbedingungen (Verdeckungen, Reflexionen, schleifende Schnitte) anzutreffen sind oder die Geometrieerfassung nur eine untergeordnete Bedeutung im gesamten Arbeitsprozess einnimmt (wie vielfach bei der Gebäudebestandserfassung, für die neue Konzepte in Kombination mit klassischem Handaufmaß vorgestellt wurden). So ist auch für die junge Technologie des Laser-Scanning festzustellen, dass ihr Leistungspotenzial nur in Kombination mit anderen Methoden optimal für die Messaufgaben der Zukunft genutzt werden kann.

Der Themenkomplex *Industrielle Messtechnik* widmete sich den Messaufgaben in kleinen Messvolumen mit höchsten Genauigkeitsansprüchen. Hier wurden neueste Entwicklungen der optischen Formenerfassung mit Streifenprojektion, Phasogrammetrie (!) oder anderen optischen Triangulationsverfahren in Kombination mit photogrammetrischen Methoden präsentiert. Die Vorträge und Diskussionen offenbarten, dass an dieser Schnittstelle zwischen klassischer Koordinatenmesstechnik und den Verfahren der Photogrammetrie sowie des Laser-Scannings Fragen der Modellbildung

ebenfalls Gegenstand der aktuellen Forschung und Entwicklung darstellen.

Die photogrammetrischen Beiträge beschäftigten sich mit aktuellen Tendenzen in klassischen und neuen Anwendungsfeldern (Denkmalpflege/Visualisierung, Versuchswesen, Erfassung von Wellenverhalten). Darüber hinaus wurden Untersuchungen und Entwicklungen zu photogrammetrischen Sensoren (5 Mega-Pixel Messkamera, Rotationszeilenkamera) und zur Optimierung von Aufnahmekonstellationen vorgestellt.

Ergänzt wurde das Themenfeld um interessante Beiträge zur optimalen Speicherung von Laser-Scanning Daten und zur Bedeutung der Messunsicherheit bei Prüfverfahren.

Vorträge einiger Instrumentenhersteller und die begleitende Firmenausstellung vervollständigten das Tagungsprogramm zu einem umfassenden Bild über Stand und Entwicklungen der 3D-Objekterfassung.

Für inhaltliche Vorbereitung sowie die reibungslose und vorbildliche Organisation sei Prof. T. LUHMANN und seinem Team um C. MÜLLER recht herzlich gedankt. Die offene und angenehme Atmosphäre hat zum besonderen Erfolg der Tagung bei den 150 Teilnehmern wesentlich beigetragen. Ohne Zweifel wird jeder der Teilnehmer wieder sehr gerne nach Oldenburg reisen, um an den geplanten 3. Oldenburger 3D-Tagen (Januar/Februar 2004) teilzunehmen.

So ist der Veranstaltung zu wünschen, dass sie sich mit dieser speziellen Mischung aus neuen Forschungstendenzen und aktuellen Anwendungsbeispielen um die 3D-Objekterfassung im Norden unserer Republik als feste Institution in diesem überschaubaren und persönlichen Rahmen von zwei Tagen etablieren wird.

Ein Tagungsband mit der Mehrzahl der Vorträge ist in Vorbereitung und wird in der zweiten Jahreshälfte 2003 im Wichmann-Verlag erscheinen.

ULRICH WEFERLING, Weimar

„Weg von der Technikfixiertheit, hin zur Anwenderorientierung mit Web Services“

Bericht zum 8. Münchner Fortbildungsseminar »Geoinformationssysteme« vom 12. bis 14. 3. 2003

Das 8. Münchner Fortbildungsseminar »Geoinformationssysteme« fand wieder unter Leitung von Prof. M. SCHILCHER an der TU München statt. Das vom „Runden Tisch GIS e. V.“ ausgerichtete Seminar war mit ca. 260 Teilnehmern trotz der parallel dazu stattfindender Cebit und einer wachsenden Anzahl an GIS-Fortbildungsveranstaltungen gut besucht.

Die Themen *Web-Services*, *OpenGIS (OGC)* und *Geodateninfrastrukturen* bestimmten das Programm der ersten Veranstaltungstage. Mit dem Schwerpunkt *Datensicherheit im Internet* wurde für den dritten Tag ein aktuelles Spezialthema aufgegriffen – auf ausdrücklichen Wunsch von Mitgliedern des „Runden Tisch e.V.“, wie Vereinsvorstandsmitglied Dr. STÜTZER in seiner Begrüßung versicherte.

Neben Vorträgen und Tutorials wurde im Rahmen des Seminars zum zweiten Mal der Förderpreis Geoinformatik des Runden Tisch GIS e. V. verliehen. Die beiden Preisträger Dr. ULRICH HUBER und BJÖRN SCHWARZE konnten sich für ihre herausragenden Arbeiten über je einen Scheck in Höhe von 2.500 € freuen.

Gemäß den Vereinszielen Nachwuchsförderung und Technologietransfer des „Runden Tisch GIS e. V.“, der während des Seminars sein 100. Mitglied begrüßen konnte, kamen auch in diesem Jahr wieder viele Nachwuchs-GIS-Experten zu Wort. In mehr als der Hälfte der Vorträge wurden zudem Projekte von Universitäten und eigene Projekte des Vereins vorgestellt – z. B. das von Prof. TEEGE präsentierte Projekt *OpenGIS im Praxistest*.

Das in GIS-Kreisen vielstrapazierte Thema *Location Based Services (LBS)* war Gegenstand des Eröffnungsvortrags und Inhalt des Tutorials „*GIS und mobile Anwendungen mit Schwerpunkt Web Services*“. Am Beispiel des Flughafens München zeigte sich,

dass es durchaus wirtschaftliche LBS-Anwendungen geben kann. Das von HALLER und PLABST vorgestellte LBS-gestützte Betonplattenmanagement legte eindrucksvoll das wirtschaftliche Potenzial einer LBS-Lösung dar, die nicht auf den Massenmarkt ausgerichtet ist, sondern die Lösung für das spezielle Problem eines abgegrenzten Nutzerkreises bietet. Die große Bedeutung der Nutzerorientierung zog sich wie ein roter Faden auch durch die Beiträge zu den Themen „*Geodienste für Location Based Services*“ (Prof. MENG, REICHENBACHER) und „*Ortsbezug in kontext-sensitiven Diensten für mobile Communities*“ (GROH). Dr. PAGÉ sprach in seinem Vortrag „*Web Services – Hoffnungsträger für die IT-Branche und für GIS?*“ gar von einem neuen Weltbild, weg von der Technikfixiertheit, hin zur Kundenorientierung. Die Web Service Technologie ermögliche Komponenten-basierte Lösungen mit verteilter Datenhaltung, die stark auf die Bedürfnisse der Endnutzer abgestimmt werden können. „Implementation from the user’s perspective“ sei der Leitsatz, den es auch bei der Entwicklung von Geoinformationssystemen zu berücksichtigen gelte. GIS oder Geodienste seien dabei nur als eine unter vielen Komponenten zu betrachten.

Das Potenzial Komponenten-basierter Lösungen im GIS-Bereich zeigte sich bei den Anwendungen auf Basis von OGC Web Services, die Dr. AUMANN, KUNKEL und DONAUBAUER demonstrierten. Die vorgestellten Lösungen aus dem Projekt GeoPortal „*Bürgerberatung – Baugenehmigungsverfahren*“ und „*mobile Liegenschaftsauskunft für Gemeinden*“ nutzten zum Teil identische OGC Web Services und erfüllten aus Benutzersicht doch sehr unterschiedliche Aufgaben. Das an der TU München durchgeführte und aus Mitteln der High-Tech-Offensive der Bayerischen Staatsregierung finanzierte Projekt GeoPortal machte anschaulich, was erreicht werden kann, wenn vorhandene verteilte öffentliche Geodatenbanken mittels Geodiensten verfügbar gemacht werden.

In seiner Moderation wies Prof. SCHILCHER mehrmals darauf hin, dass die neuen,

Web-Services-basierten Auskunftslösungen etablierte GIS, wie sie von Experten für die Datenerfassung, Datenhaltung und -analyse eingesetzt werden, nicht ersetzen können. Vielmehr sei die Zukunft in der Kombination beider Ansätze zu sehen, wobei die vom OGC definierten Standards die Brücke zwischen beiden Welten schlagen können.

Zwei Beiträge zum Aufbau von Geodateninfrastrukturen in Nordrhein-Westfalen (FITZKE) und Bayern (LUDWIG) zeigten sehr unterschiedliche Ansätze in den Vorgehensweisen dieser Bundesländer. Beiden Ansätzen gemein scheint jedoch die Verwendung von OGC Standards zu sein. LUDWIG kündigte an, dass die Digitale Flurkarte der Bayerischen Vermessungsverwaltung, die noch im Jahr 2003 flächendeckend für ganz Bayern zur Verfügung stehen wird, in naher Zukunft für Behörden über die OGC Web-Mapping Schnittstelle abgerufen werden kann. Die Technik ist bei der Verwirklichung einer Geodateninfrastruktur (GDI) wohl das geringere Problem. Zu lösen sind vielmehr administrative und rechtliche Fragen, um die Nutzung von Geodaten in Verwaltung und Wirtschaft voranzutreiben.

Die Vorstellung von LEGION – dem Geoinformationssystem Online für Ländliche Entwicklung – war eine gelungene Überleitung vom Vortragsblock OGC und Geodateninfrastrukturen hin zu den GIS-Anwendungsbeispielen. NADOLSKI zeigte ein Web-Auskunftssystem, das sowohl Fachdaten der Bayerischen Verwaltung für Ländliche Entwicklung enthält, als auch Geobasis- und Fachdaten anderer Verwaltungen. Diese werden in der aktuellen Ausbaustufe noch als Datenkopien in das System integriert, sollen in Zukunft im Rahmen einer GDI Bayern aber online über die OGC Web-Mapping Schnittstelle eingebunden werden. Die Machbarkeit wurde durch Zugriffe auf OGC Web Services aus dem oben genannten High-Tech-Offensive-Projekt GeoPortal live demonstriert.

Für aufgelockerte „GIS-Unterhaltung“ sorgten die beiden Vorträge aus Österreich und der Schweiz im Best-Practice-Teil des Fortbildungsseminars. So konnte man vom

Entwickler des Standortinformationssystems Salzburg erfahren, dass Damenbekleidung eher in den Randbezirken Salzburgs gekauft wird, während sich die Herren lieber in der Innenstadt ausstatten. Und im Vortrag „*St. Moritz: Top of the World und Top in GIS*“ wurde vorgeführt, wie in dem Nobelskiort Standorte für Müllcontainer ermittelt werden, ohne dabei zahlungskräftige Hauseigentümer zu verärgern – selbstverständlich GIS-gestützt.

Die Diskussionen nach den Vorträgen der ersten beiden Veranstaltungstage warfen immer wieder Fragen zu Datenschutz und Datensicherheit im Zusammenhang mit internetbasierten Zugriffen auf. Diese Problematik hatte der Veranstalter wohl schon bei der Zusammenstellung des Programms erkannt und dem Thema einen eigenen Veranstaltungsblock gewidmet. Ein Grundlagenvortrag aus Sicht eines Vertreters des Bayerischen Landesbeauftragten für den Datenschutz lieferte wichtige Informationen sowohl für Betreiber von GIS als auch für jeden, der täglich online ist.

Die technische Basis für IT-Sicherheit in vernetzten Systemen beleuchtete ein Vortrag von Prof. BAUMGARTEN, wobei auf verschiedene Bedrohungsszenarien, wie das Abhören oder Verfälschen von Informationen, eingegangen wurde. Interessant ist in diesem Zusammenhang die Beobachtung, dass Angriffe auf die Sicherheit häufig nicht durch Hacker aus dem WWW sondern oft unmittelbar aus dem Intranet erfolgen. BAUMGARTEN schloss mit der Feststellung, dass die technischen Voraussetzungen für ausreichende Sicherheit im Internet grundsätzlich gegeben seien, dass es bei der Umsetzung dieser Möglichkeiten jedoch noch viel zu tun gebe, insbesondere sei das Bewusstsein für Sicherheitsaspekte bei Nutzern und Betreibern von Internetdiensten zu schärfen.

Strategien für eine Kontrolle des Zugriffs auf schätzenswerte Datenbestände (Beispiel ALB), die mittels Geo Web Services verfügbar gemacht werden sollen, zeigte MATHEUS in seinem Vortrag auf. Der Bezug zu GIS wurde deutlich in dem auch die Vergabe Raum-bezogener Zugriffsrechte dargestellt wurde.

Den Abschluss für den Themenblock „*Datensicherheit im Internet*“ bildete ein Anwendungsbeispiel aus dem e-Government-Bereich: Das preisgekrönte Projekt aus der Stadt Esslingen zeigt u. a. wie die Amtlichkeit bei der Übermittlung einer Liegenschaftskarte über das Internet mit den Sicherheitstechnologien digitales Wasserzeichen und digitale Signatur hergestellt werden kann. Ein Sicherheitsmerkmal der Systemarchitektur in Esslingen ist die Trennung des Produktivsystems von einem speziellen, periodisch aktualisierten Auskunftsdatenbestand.

Eine gelungene Abendveranstaltung mit bayerischem Büfett, die bei vielen Teilnehmern wegen der Möglichkeiten zur Kontaktaufnahme geschätzt wird, rundete das Seminar ab.

Fazit: Ein sehr gelungenes und gut organisiertes Seminar, das von gut vorbereiteten Referenten profitierte. Bei der Programmgestaltung fielen die neutrale, Hersteller-unabhängige Position des Veranstalters „Runder Tisch GIS e. V.“ sowie die Berücksichtigung von Spezialthemen positiv auf.

Das 9. Münchner Fortbildungsseminar »Geoinformationssysteme« ist für 10.–12. März 2004 geplant.

Weitere Informationen unter <http://www.runder-tisch-gis.de>

BARBARA DONAUBAUER, München

Verleihung des Förderpreises Geoinformatik 2003 an der Technischen Universität München durch den Runden Tisch GIS e. V.

Anlässlich des 8. Münchner Fortbildungsseminars Geoinformationssysteme an der TU München wurde zum zweiten Mal der mit 2.500 EUR dotierte Nachwuchsförderpreis des Vereins Runder Tisch GIS e. V. verliehen.

Eingereicht wurden elf Diplomarbeiten und zwei Dissertationen von Universitäten und Fachhochschulen aus dem gesamten deutschsprachigen Raum. Die Arbeiten



Die Preisträger 2003 (von rechts): Dipl.-Ing. BJÖRN SCHWARZE und Dr.-Ing. ULRICH HUBER mit Prof. SCHILCHER (Vorstand Runder Tisch GIS e.V.)

mussten mit „sehr gut“ bewertet sein. Laut den Juroren Prof. Frankenberger, Prof. Meng und Prof. Teege war das Niveau der Arbeiten im Vergleich zu 2002 nochmals angestiegen, so dass die Wahl einer besten Arbeit schwer fiel. Daher wurde beschlossen, auch in diesem Jahr zwei Preise zu vergeben. Die Diplomarbeit „Erreichbarkeit mit dem ÖPNV – Eine GIS-gestützte Analyse der Erschließungs- und Verbindungsqualität des ÖPNV“ von Dipl.-Ing. BJÖRN SCHWARZE, Universität Dortmund, und die Dissertation „Das Referenz-Geoinformationssystem ‚Nationalpark Bayerischer Wald‘, eine fachübergreifende Forschungsplattform für die Geoinformatik“ von Dr.-Ing. ULRICH HUBER, Technische Universität München, wurden jeweils mit 2.500 EUR ausgezeichnet. Alle dreizehn Teilnehmer wurden vom Runden Tisch GIS e. V. zum Fortbildungsseminar eingeladen und bekamen ein Geschenk von Prof. Frankenberger (Bayerische Vermessungsverwaltung) überreicht.

Auch 2004 wird der Förderpreis Geoinformatik wieder verliehen werden. Informationen dazu finden Sie unter <http://www.runder-tisch-gis.de>.

KATHRIN JAENICKE, München

Bericht über den Workshop „New Developments in Close Range Photogrammetry“

Bonn, 25.–28. März, 2003

Die Entwicklung der Photogrammetrie im Nahbereich war nie stetig. Nach einer Zeit der scheinbaren Stagnation, während der sich die Aerophotogrammetrie sprunghaft entwickelte, erleben wir jetzt eine dynamische Entwicklungsphase im Nahbereich, die gekennzeichnet ist durch digitale Aufnahmegерäte und neue Algorithmen. Zu dieser erneuten Hinwendung zu „Close Range“ haben besonders Forschungen, Entwicklungen und Anwendungen im Computer Vision (CV) Bereich beigetragen. Der Förderung des Dialogs zwischen den Fachleuten, die im klassischen Nahbereich der Photogrammetrie arbeiten und solchen, die ähnliche Fragestellungen aus der Sicht von CV aufbereiten, war der Workshop „New Developments in Close Range Photogrammetry“ am 27. und 28. 03. 2003 in Bonn gewidmet. Eingeladen hatten zwei Protagonisten der vorher skizzierten beiden „Lager“, Prof. W. FÖRSTNER, Uni Bonn und Prof. T. LUHMANN, Fachhochschule Oldenburg. Die Vorträge beleuchteten nicht nur den aktuellen Stand der Entwicklung sondern gaben auch Anlass zu kritischer Hinterfragung und pointierten Meinungsäußerungen.

Themen, wie Auswertung von Bildsequenzen, Kalibrierung von Aufnahmegерäten, Signalisierung, Orientierungsverfahren von Bildpaaren und Triplets, Automatisierung von Prozessen der Bilderfassung und -Auswertung, CAD-gestützte Erfassungs-Umgebungen bis hin zur Rekonstruktion von Bewegungsabläufen, Anforderungen an Unternehmen bez. ihrer Struktur und ihrer Dienstleistungen sowie zukünftiger Erwartungen, Entwicklungen und Möglichkeiten spiegeln das breite Angebot an Vorträgen wider. Die Folien der Vorträge können unter der Adresse www.ipb.uni-bonn.de/events/workshop03.htm eingesehen werden.

Die Diskussionen, immer wieder angeregt durch die Veranstalter, ergaben als Fazit, dass es sich lohnen würde, bisherige Lösungen robuster, effektiver und schneller zu ma-

chen, wobei es wohl auch in Zukunft dabei bleiben wird, dass die Einen (Photogrammeter) mehr Aufmerksamkeit der Lösungskorrektheit und -genauigkeit widmen werden, während den Anderen (CV-Fachleute) die möglichst schnelle Rekonstruktion komplexer Szenen in 3D am Herzen liegt. Für sie ist Genauigkeit im Detail erst in zweiter Linie ein Bewertungskriterium. Hier zeigt sich der Unterschied zwischen dem Ergebnis eines optimierten Messprozesses und einem Visualisierungsprodukt am deutlichsten.

Vor dem eigentlichen Symposium fand am 25. und 26. 3. 2003 ein eineinhalbtägiges Tutorial „*New Orientation Methods in Photogrammetry*“ an gleicher Stelle statt, das sich als wertvolle Vorbereitung für den Workshop herausstellen sollte. Prof. W. FÖRSTNER gelang es, den ca. 30 Teilnehmern eine sehr ansprechende Einführung in die Grundprinzipien der projektiven Geometrie zu geben. Begonnen mit den Elementen Punkt, Linie, Ebene und ihrer Formulierung sowohl im Objekt- als auch Bildraum, wurden die Bedingungen für Kollinearität und Koplanarität erarbeitet. Mit homogenen Koordinaten lassen sich diese Bedingungen für die Intersektion von Linien oder Ebenen im 3D Raum ebenso elegant formulieren wie Transformationen oder sog. Dualitäten in 2D und 3D. Damit nicht genug, auch die Orientierung von Bildern (Ebenen im Raum) und die Nutzung von Bedingungen zur Berechnung eindeutiger Lösungen

bei Orientierungsaufgaben mittels projektiver Geometrie wurden behandelt. Das Konzept der idealen (Linien-erhaltenden) Kamera wurde durch Einführung von nichtlinearen Verzeichnungstermen erweitert. Schließlich wurden die Abbildungseigenschaften von 3D Objekten in 1, 2 und 3 Bildern erarbeitet. Ergänzt wurden die Ausführungen durch eine Einführung in die Schätz- und Testtheorie für Parameter und Relationen zwischen ihnen, die es erlaubt, auch geometrische Bedingungen zu bewerten. Insbesondere für den Nahbereich, wo häufig lokale Koordinatensysteme zur Anwendung kommen, kann die neue Betrachtungsweise gewinnbringend sein. Erste Ansätze für die Entwicklung von Strategien und Software zur Orientierung und Bewertung von Bildverbänden basierend auf diesem Konzept sind im Entstehen. Ein Grund dafür könnte die Möglichkeit sein, zur allgemeinen Formulierung von Abhängigkeiten zwischen 3D-Raum und seiner 2D-Abbildung Beziehungen zu verwenden, die in ihren Parametern linear sind. Diese Formulierungsweise kann die Geschwindigkeit steigern, mit der eine optimale Lösung gefunden wird. Die Fortpflanzung von Genauigkeitseigenschaften ist auf Grund dieser Parametrisierung einfacher zu formulieren und bietet daher gute Voraussetzungen für online Lösungen.

MANFRED STEPHANI, München

Hochschulnachrichten

Technische Universität Berlin

Von der Fakultät für Architektur, Umwelt und Gesellschaft der Technischen Universität Berlin wurde Frau Dipl.-Ing. CORNELIA LESER am 13. Februar 2003 zum Dr.-Ing. promoviert. Das Thema ihrer Dissertation lautet „*Entwicklung operationell einsatzfähiger Methoden zur Biotoptypen-Kartierung anhand hochauflösender HRSC-Daten*“. Gutachter waren Prof. Dr. HARTMUT KENNEWEG und Prof. Dr.-Ing. JÖRG ALBERTZ.

Zusammenfassung: Nationale Naturschutzziele und internationale Vereinbarungen zwingen zur Entwicklung effektiver, operationell einsatzfähiger Methoden zur Erfassung und Beobachtung der Landnutzung und Biotoptypen. Wie zur Beantwortung der meisten naturschutzfachlichen Fragestellungen, sind auch für die Kartierung von Biotop- und Nutzungstypen räumlich und thematisch sehr hochauflösende Auswertungen erforderlich. Die bislang angewandten fernerkundlichen Kartierverfahren können aufgrund nur bedingt geeigneter Datengrundlagen und Auswertungsmethoden derartige Aufgaben jedoch nicht hinreichend operationell, das heißt effizient und mit hoher Auswertungssicherheit, bewältigen.

Demgegenüber sind die Voraussetzungen von HRSC-Flugzeugscannerdaten als Datengrundlagen zur fernerkundlichen Biotop- und Nutzungstypenkartierung vielversprechend: Die in unterschiedlichen Spektralbereichen aufgenommenen, digitalen Daten weisen eine sehr hohe geometrische Auflösung und eine hervorragende Lagegenauigkeit auf. Die vorliegende Arbeit untersucht daher den möglichen Beitrag von HRSC-Daten zur Beantwortung naturschutzfachlicher Fragestellungen, insbesondere der Biotop- und Nutzungstypenkartierung. Unter Beachtung der eine operationelle Auswertung derzeit erschwerenden Rahmenbedingungen werden Methoden entwickelt, mit denen die Daten operationell ausgewertet werden können.

Die besondere Schwierigkeit der Aufgabenstellung ergibt sich einerseits aus den für die Entwicklung operationeller Methoden zur Biotop- und Nutzungstypenkartierung noch ungünstigen Rahmenbedingungen, welche durch mannigfaltige Unsicherheiten hinsichtlich der zugrunde zu legenden thematischen Systematik, hinsichtlich einiger Eigenschaften der Ausgangsdaten sowie hinsichtlich der Eignung der zur Verfügung stehenden Auswertungsinstrumente zu beschreiben sind. Zum anderen ist die Ausgangsfragestellung hochkomplex, da bei der Kartierung von Biotop- und Nutzungstypen neben fernerkundlich direkt ablesbaren Objektmerkmalen auch mannigfaltige, über Sichtbares hinausgehende Zusammenhänge erfasst und berücksichtigt werden müssen. Gerade automatisierte Methoden sind daher, insbesondere auf naturnahen, heterogen zusammengesetzten Untersuchungsgebieten, nicht übertragbar und führen nicht selten zu unbefriedigenden Ergebnissen.

Angesichts der problematischen Rahmenbedingungen und der komplexen Ausgangsfragestellung sind operationelle Kartiermethoden nur durch Kompromisslösungen zu erzielen: Großräumige fernerkundliche Auswertungen sind derzeit nur durch visuelle Interpretationen hinreichend effizient und sicher durchführbar. Die zu diesem Zweck entwickelte Methode zur visuellen Auswertung beruht auf einer On-Screen-Auswertung, die einerseits zu einer enormen Zeitersparnis gegenüber der bislang praktizierten, in mehreren Auswertungsschritten ablaufenden CIR-Luftbildkartierung führt. Darüber hinaus weisen die Geometrien der Auswertungsergebnisse deutlich höhere Lagegenauigkeiten auf, als mit herkömmlichen Methoden zu erreichen sind, was auch spätere automatisierte Aktualisierungen erleichtert. Falls die im HRSC-Bild erzielte Kantenschärfe eine sichere Ansprache von Baumarten verhindert, muss dabei jedoch auch auf die in einigen Bundesländern bereits vorliegenden CIR-Luftbild-Kartierungs-

ergebnisse vergangener Jahre oder auf Geländekartierungen zurückgegriffen werden.

Demgegenüber können kleinräumige Kartierungen, insbesondere Monitoring-Aufgaben in Schutzgebieten, auch automatisiert über untersuchungsgebietspezifische Klassifikationsabläufe durchgeführt werden. Zur Steigerung der Übertragbarkeit und Transparenz der Abläufe bezieht sich die thematische Auflösung dabei auf die Beantwortung der im jeweiligen Untersuchungsgebiet relevanten Einzelfragestellungen, orientiert sich also nicht vordergründig an der Systematik bestehender Biotop- und Nutzungstypenkataloge. Um die Geometriebildung der Auswertungsergebnisse zu verbessern und auf multitemporale Auswertungen verzichten zu können, wird der thematischen Auswertung zusätzlich eine wissensbasierte Grobsegmentierung vorangestellt.

Technische Universität Wien

Herr Dipl.-Ing. NORBERT PFEIFER hat sein Doktoratstudium im Oktober 2002 an der Fakultät für Technische Naturwissenschaften und Informatik der TU Wien mit der Dissertation „*3D Terrain Models on the Basis of a Triangulation*“ zum Doktor der technischen Wissenschaften (Dr. techn.) abgeschlossen.

1. Begutachter: o.Univ. Prof. Dr. KARL KRAUS (Technische Universität Wien, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung); 2. Begutachter: o.Univ. Prof. Dr. HELMUT POTTMANN (Technische Universität Wien, Institut für Computergraphik und Algorithmen)

Kurzfassung: Der Titel der vorliegenden Arbeit ist „*3D-Geländemodelle auf Basis einer Triangulierung*“. Digitale Geländemodelle (abgekürzt DGM), also Beschreibungen der Höhe und Lage der Erdoberfläche in einer Form, die für die Bearbeitung auf Computern geeignet ist, werden in vielen Gebieten der Wissenschaft und Praxis erfolgreich eingesetzt. Die Anwendungen reichen von der Ableitung von Höhenschichtlinien für topographische Karten bis zur Modellierung des

Wasserabflusses nach einem Unwetterereignis, um nur zwei zu nennen. In vielen geographischen Informationssystemen sind Geländemodelle ein unverzichtbarer Bestandteil. Die dort verwendeten Modelle unterliegen aber einer Einschränkung. Mathematisch formuliert sind sie Graphen bivariater Funktionen. Mehr von einer praktischen Seite beleuchtet heißt das, dass die Modellierung von Überhängen unmöglich ist, von steilen Wänden und Klippen nur sehr unzureichend möglich ist, und Höhlensysteme, aber auch Brücken ebenso nicht modelliert werden können. Um dieses Charakteristikum zum Ausdruck zu bringen werden solche Modelle oft als „2.5D“ bezeichnet.

In dieser Arbeit werden Methoden zur Ableitung von Geländemodellen vorgestellt, die diesen Beschränkungen nicht unterliegen.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Glätteheit des Modells. Das uns umgebende Gelände ist im Allgemeinen glatt, mit Ausnahme der sogenannten Geländekanten, und daher soll auch ein DGM davon glatt sein. Es gibt verschiedene Möglichkeiten glatte 3D-Geländemodelle zu erzeugen, aber diese Arbeit ist auf jene Methoden beschränkt, die mittels einer Triangulierung erstellt werden. Die Erzeugung, Verbesserung und Ausdünnung von Triangulierungen ist nicht behandelt, aber Verweise auf die Literatur sind angegeben.

Zwei verschiedene Ansätze, um aus einer Triangulierung eine glatte Oberfläche zu erzeugen werden vorgestellt: Flächenverbände mit parametrischen Patches und Subdivision (Unterteilungsflächen). Im Rahmen der beiden Zugänge ist jeweils eine Methode entwickelt worden, die den Anforderungen in der topographischen Geländemodellierung genügt. Beiden entwickelten Verfahren ist gemein, dass zuerst eine Filterung der Triangulierung durchgeführt werden muss. Die Messung von Punkten und Linien am Gelände erfolgt immer mit zufälligen Fehlern, die von dem jeweils verwendeten Verfahren abhängen. Zur Filterung wird die so genannte Einzelpunktprädiktion angewandt, die eine qualifizierte Eliminierung der zufälligen Messfehler erlaubt. Für jeden Punkt, also jeden Knoten der Triangulierung, wird

eine verbesserte Position aufgrund der Lage seiner benachbarten Punkte geschätzt. Die Differenz von der beobachteten zur ‚fehlerfreien‘ Position ist der Verbesserungsvektor.

Glatte Flächenverbände über einer Triangulierung werden im Allgemeinen schrittweise erstellt. Zuerst wird für jede Kante der Triangulierung eine Kurve auf der Fläche bestimmt, die die beiden Kantenendpunkte verbindet. Die in einem Knoten der Triangulierung, also in einem der gegebenen Punkte, zusammentreffenden Kurven müssen zu einer gemeinsamen Tangentialebene an die Fläche passen. Die Tangenten in den Kurvenendpunkten müssen also in einer Ebene liegen. Jedes Dreieck der Triangulierung wird nun durch ein gekrümmtes dreieckiges Flächenstück (einen Patch) ersetzt, das die Randkurven zu den Dreiecksseiten interpoliert. Damit erhält man eine stetige Fläche, was aber noch nicht ausreicht, da eine glatte Fläche rekonstruiert werden soll. Bei der Bestimmung der Patches muss daher eine Konstruktion angewandt werden, die sicherstellt, dass benachbarte Patches nicht nur die Randkurve teilen, sondern auch dasselbe Feld von Tangentialebenen entlang dieser Kurve haben. Eine solche Fläche wird als geometrisch stetig erster Ordnung bezeichnet (G1).

Die entwickelte Methode basiert auf (bivariaten) polynomialen Patches vierten Grades, die als Beziér-Dreiecke beschrieben werden. Der Vorteil der Beschreibung auf Basis der Beziér-Bernstein-Polynome liegt darin, dass die Koeffizienten des Polynoms in dieser Form eine geometrische Bedeutung haben. Wie oben erwähnt, werden zuerst die zufälligen Messfehler eliminiert. In diesem Schritt kann auch die Tangentialebene an die Fläche im jeweiligen Punkt abgeschätzt werden. Alternativ dazu kann der Normalvektor beispielsweise auch durch Mittelung der Normalvektoren aller Dreiecke, die in einem Punkt zusammentreffen, festgelegt werden. Im nächsten Schritt werden die Randkurven der Patches bestimmt, die in diesem Fall (univariate) Polynome vom Grad drei sind. Die Tangenten in den Endpunkten müssen normal zu den vorher bestimmten Normalvektoren sein. Damit sind

die Randkurven der Patches bestimmt, es müssen noch die ‚inneren Parameter‘ (also Koeffizienten des Polynoms) bestimmt werden, die sowohl die Form des Patches im Inneren, also auch die Tangentialebenen entlang der drei Randkurven beeinflussen. Im folgenden Schritt wird entlang dieser Randkurven ein Feld von Normalvektoren bestimmt, indem die beiden Endpunkt-Normalen ineinander überblendet werden. Zu jedem Randkurvenpunkt gibt es somit einen Normalvektor zur Fläche. Die inneren Parameter der Patches werden nun so bestimmt, dass die Tangentialebenen der Patches möglichst normal auf die abgeschätzten Normalvektoren sind, die Minimierung erfolgt im Kleinste-Quadrate-Sinn. Da im Allgemeinen keine exakte Interpolation dieser Normalvektorenfelder, sondern nur eine Approximation möglich ist, entsteht keine vollständig glatte, sondern nur eine approximativ glatte Fläche, man spricht auch von ‚Epsilon-Stetigkeit‘ (epsilon-G1). Wenn zwischen zwei benachbarten Patches die Winkel zwischen den aufeinander treffenden Tangentialebenen zu groß sind, müssen die Patches unterteilt werden um mehr Freiheitsgrade und somit einen besseren Übergang zu gewährleisten. (Es soll erwähnt werden, dass diese Methode teilweise in meiner Diplomarbeit entwickelt wurde, obschon sie dort nicht so sehr im Kontext der Geländemodellierung steht.)

Die zweite Methode, die zum Erstellen von glatten 3D-Geländemodellen untersucht worden ist, arbeitet nach dem Subdivision-Prinzip. Die Triangulierung wird dabei schrittweise unterteilt, wobei mehr und mehr Punkte und Kanten eingefügt werden. Die Winkel zwischen benachbarten Dreiecken nähern sich dabei 180° , wodurch die Grenzfläche, die man theoretisch nach unendlich vielen Unterteilungsschritten erhält, glatt ist. Ein großer Vorteil dieses Verfahrens ist, dass unabhängig vom Unterteilungsniveau immer eine Triangulierung vorliegt. Für diese Datenstruktur sind viele Algorithmen, also z.B. Darstellung, Verschneidung usw. sehr einfach. Je nach gestellter Aufgabe kann das den Genauigkeitsanforderungen entsprechende Niveau herangezogen werden.

Auch bei der entwickelten Subdivision-Methode zur Rekonstruktion der Gelände­fläche müssen, wie oben erwähnt, die zufälligen Messfehler zuerst eliminiert werden. Im angewandten Unterteilungsschema wird in jeder Kante ein zusätzlicher Punkt eingefügt, der aber nicht der geometrische Kantenmittelpunkt sein muss. Ein Verfeinerungsschritt besteht im Einfügen von einem Punkt in jede Kante und der entsprechenden zusätzlichen Vermaschung der Triangulierung. Die Koordinaten der neu einzufügenden Punkte werden wie folgt bestimmt: in beiden Kantenendpunkten wird eine lokale Fläche abgeschätzt. Diese approximiert den Kantenendpunkt und seine Nachbarpunkte. Für die beiden Flächen wird dann jeweils ein für den Kantenmittelpunkt repräsentativer Punkt auf den lokalen Flächen bestimmt. Das Mittel der beiden so erhaltenen Punkte ist die Position des neu einzufügenden Punktes. Auch die Kantenendpunkte erhalten neue Positionen, nämlich jene, die den jeweiligen Punkten auf der lokalen Fläche entsprechen. In den ursprünglich gegebenen Punkten werden keine rein approximierenden Flächen verwendet, sondern die dort verwendeten lokalen Flächen interpolieren den ursprünglich gegebenen Punkt und approximieren seine Nachbarn. Dadurch interpoliert die Grenzfläche die Punkte der gegebenen Triangulierung.

Anhand von Vergleichen zwischen der Subdivision- und der Flächenverband-Methode wird untersucht, welches Verfahren den Anforderungen in der topographischen Geländemodellierung besser entspricht. Dazu werden sowohl tatsächliche Messungen am Gelände als auch synthetische Beispiele herangezogen. In den untersuchten Fällen sind mit den Unterteilungs-Flächen, also mit Subdivision, bessere Ergebnisse erzielt worden.

Ein kurzer Ausblick auf die Anwendungen von Geländemodellen, die Überhänge, Höhlen, etc. enthalten, wird im letzten Kapitel gegeben.

Die Dissertation wird als Geowissenschaftliche Mitteilung, Heft Nr. 62, ISBN 3-9500791-7-3 veröffentlicht.

Hochschule Vechta

eLearning – Tutorial zum Thema »Airborne Laserscanning«

Die schnelle Entwicklung in Geoinformatik und Fernerkundung bedingt eine ständige Aktualisierung der technischen und methodischen Kenntnisse, sodass ein erhöhter Bedarf an Lehrmaterialien im Aus- und Weiterbildungsbereich sowohl zu Grundlagen-, insbesondere aber auch zu aktuellen Spezialthemen besteht. Statt auf die zeitaufwändige Entwicklung solcher Materialien in konventioneller (Buch-)Form zu warten, bietet das **eLearning** eine Lehr- und Lernform an, die relativ schnell aktualisiert sowie orts- und Fächer-übergreifend genutzt werden kann.

Vor diesem Hintergrund ist am Forschungszentrum für Geoinformatik und Fernerkundung (FZG) der Hochschule Vechta ein eLearning-Modul zum aktuellen Thema »**Airborne Laserscanning**« entwickelt worden, das eine umfassende Einführung in die bisher wenig behandelte Thematik bietet und zum Selbststudium für Interessierte aus unterschiedlichen Disziplinen wie Geoinformatik, Geodäsie, Geographie oder Umweltwissenschaften gedacht ist.

Bei der inhaltlichen Konzeption des Tutorials wurden führende Experten aus der Praxis einbezogen. Der Schwerpunkt wird auf das Aufnahmeprinzip des Laserscanning gelegt, darüber hinaus werden aber auch allgemeine Auswerteschritte sowie Anwendungen skizziert. Eine große Anzahl von Abbildungen sowie zusätzliche Dokumente ermöglichen einen vertiefenden Einblick in die Materie. Neben der reinen Wissensvermittlung werden auch Übungsaufgaben in Form von Lerndialogen angeboten, sodass auch ein – bereits erfolgreich getesteter – curricularer Einsatz in der Hochschulausbildung möglich ist. In Kürze wird auch eine englisch-sprachige Version erscheinen.

Die Nutzung des Tutorials ist kostenlos, es kann ohne Anmeldung über <http://www.fzg.uni-vechta.de/js> gestartet werden.

JOCHEN SCHIEWE, Vechta

eLearning-Tutorial: **Laserscanning**

Willkommen beim Internet-Tutorial des

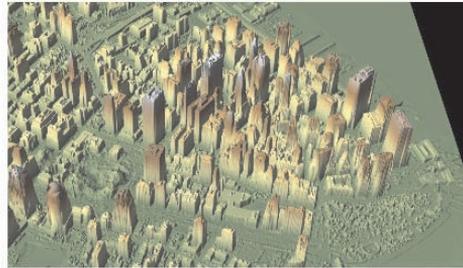
**Forschungszentrum
Geoinformatik und
Fernerkundung**



an der

Hochschule Vechta

© Jochen Schiewe



Laserscanning-Aufnahme von
Manhattan, 10 Tage nach dem 11.
September 2001

(C) NOAA / U.S. Army JPSPD

Dieses Tutorial ist zum **Selbststudium** und als Einführung in das Thema "Laserscanning" vorgesehen.

Besonderer **Dank** für die konstruktive Kritik sowie Input gilt Dr. Rolf Katzenbeisser (Fa. TopoSys) sowie Dipl.-Ing. Christian Wever (Fa. TopScan).

Curricular eingebunden ist das Tutorial im Rahmen der Lehrveranstaltungen "Einführung in die Fernerkundung" sowie "Methoden der Fernerkundung" in den Studiengängen "Umweltwissenschaften" und "Umweltmonitoring" an der Hochschule Vechta.

Los geht's:



Fragen und Anregungen sind herzlich willkommen!

Die Startseite des eLearning-Tutorials zum Thema „Airborne Laserscanning“ (siehe S. 358).

Vorankündigungen

2003

1.–5. September: **49. Photogrammetrische Woche** im Institut für Photogrammetrie der Universität **Stuttgart**. Auskünfte durch: Konferenzsekretärin Martina Kroma, Geschwister-Scholl-Str. 24 D, D-70174 Stuttgart, Tel.: +49-711-121-3201, Fax: +49-711-121-3297, www.ifp.uni-stuttgart.de e-mail: martina.kroma@ifp.uni-stuttgart.de

8.–9. September: **Joint Workshop of ISPRS WG IV/3, 6 & 7 Challenges in Geospatial Analysis, Integration and Visualization II** in **Stuttgart**. Abstract-Abgabetermin: 1.5.2003. Auskünfte durch Dr. Jochen Schiewe, Tel.: +49-4441-15558, Fax: +49-4441-15445, e-mail: jschiewe@fzg.uni-vechta.de, <http://www.iuw.uni-vechta.de/personal/geoinf/jochen/isprs03.htm>

8.–12. September: **SPIE's Remote Sensing Europe** in **Barcelona**. Auskünfte durch: SPIE, Tel.: +1-360-676-3290, Fax: +1-360-

647-1445, e-mail: spie@spie.org, <http://www.spie.org/>

9.–11. September: **23. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF** „Auf dem Weg zu operationellen Prozessketten in Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation“ in **Bochum**. Auskünfte durch: Dr. Klaus-Ulrich Komp, Präsident DGPF, e-mail: Prasident@dgpf.de, Dr.-Ing. Manfred Wigenhagen, Sekretär DGPF, e-mail: Sekretaer@dgpf.de und Prof. Dr.-Ing. Franz-Josef Heimes, FH Bochum, FB Vermessung und Geoinformatik, Lennerhofstr. 140, 44801 Bochum, Tel.: 0234-3210517, Fax: 0234-3214223, e-mail: franz-josef.heimer@fh-bochum.de und www.dgpf.de, www.fh-bochum.de

10.–12. September: The **Annual Conference** of the Remote Sensing and Photogrammetric Society „**Scales and Dynamics in Observing the Environment**“ in **Nottingham, UK**.

Auskünfte durch: RSPSoc Office, Tel.: +44-1159-515 435, Fax: +44-1159-515 249, e-mail: rspsoc@nottingham.ac.uk, www.geog.nottingham.ac.uk/~rs psoc03

14.–20. September: 6th **International Symposium on Tropospheric Profiling „ISTP 2003: Needs & Technologies“** in **Leipzig**. Auskünfte durch: Frau Ulla Wandinger, Tel.: +49-341-235-2154, Fax: +49-341-235-2361, e-mail: istp@tropos.de, http://istp2003.tropos.de:8085/

17.–19. September: **INTERGEO 2003** in **Hamburg**. Auskünfte durch: www.dvw.de, www.intergeo2003.de und www.hinte-messe.de

17.–19. September: **ISPRS Joint Conference of WG II/IV, III/4, III/5, III/6 Photogrammetric Image Analysis (PIA'03)** in **München**. Auskünfte durch: Prof. Helmut Mayer, Tel.: +49-89-6004-34 29/34 55, Fax: +49-89-6004-40 90, e-mail: Helmut.Mayer@UniBw-Muenchen.de oder: pia03@remotesensing-tum.de http://serv.photo.verm.tu-muenchen.de/pia03 http://www.remotesensing-tum.de/pia03

22./23. September: **ISPRS WG I/5 Workshop „Theory, Technology and Realities of Inertial/GPS Sensor Orientation“** in **Barcelona**. Auskünfte durch: WG I/5 Chair Prof. Karsten Jacobsen, Tel.: +49-511-762-24 85, Fax: +49-511-762-24 83, e-mail: karsten@ipi.uni-hannover.de

22.–24. September: Universitätslehrgang **Laserscanning** – Datenerfassung und anwendungsorientierte Modellierung – im Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung (I.P.F.) der **TU Wien**. Auskünfte durch: o.Univ.Prof. Dr. Karl Kraus, Gußhausstraße 27-29, A-1040 Wien. www.ipf.tuwien.ac.at/events/uni_laser.html

22.–25. September: 6th **Conference (ISPRS Comm.V, FIG, IAG) on „Optical 3D Measurement Techniques“** in **Zürich**. Auskünfte durch: Liliane Steinbrueckner, Tel.: +41-1-633-31 57, Fax: +41-1-633-11 01, e-mail: stein@geod. baug.ethz.ch, http://www.Photogrammetry.ethz.ch/optical3d

22.–27. September: **The European Academy of Forensic Science Third Triennial Meeting in Istanbul**, Türkei. Auskünfte durch: EAFS 2003, Tel.: +90-212-287-5800, Fax: +90-212-263-4581, e-mail: eafs2003@enfsi.org, www.eafs2003.org/

23./24. September: **AgA-Tagung** („Arbeitsgruppe **Automation in der Kartographie** der DGfK“) beim Thüringer Landesvermessungsamt, Hohenwindenstraße 13a, in 99086 **Erfurt**. Nähere Hinweise, incl. Aufruf zur Einreichung von Beiträgen: www.ikg.uni-hannover.de/aga.

29. September–3. Oktober: 54th **International Astronautical Congress in Bremen**. Auskünfte durch: www.iac2003.org/ und: 54th IAC Secretariat, Congress Office, ZARM, Uni of Bremen, Am Fallturm, 28359 Bremen, Tel.: 49-421-218 48 01, Fax: +49-421-218 25 21, e-mail: congress@iac 2003.org

29. September–3. Oktober: **XXI Brazilian Cartographic Congress (CBC) in Belo Horizonte**, Brasilien. Auskünfte durch: Brazilian Cartographic Society, Tel.: +55-21-2240-6901, Fax: +55-21-2262-2823, e-mail: sbc.rlk@terra.com.br, www.cartografica.org.br/

30. September–4. Oktober: **CIPA Symposium „New Perspectives to Save Cultural Heritage“** in **Antalya**, Türkei. Auskünfte durch: Symposium-Direktor Prof. Dr. Orhan Altan, Tel.: +90-212-285 38 10, Fax: +90-212-285 65 87, e-mail: oaltan@itu.edu.tr, www.cipa2003-antalya.org/

2./3. Oktober: **ISPRS Workshop WG IV/1 Spatial and Temporal Data Modelling: Specifications, standards, formalisms and other system design issues in Quebec**, Kanada. Auskünfte durch: Yvan Bédard, Chair WG IV/1, Tel.: +1-418-656-213136 94, Fax: +1-418-656-3607, e-mail: yvan.bedard@scg.ulaval.ca, www.commission4.isprs.org/wg1

4.–9. Oktober: „**Polar Regions and Quaternary Climate**“. **EuroConference** on the Comparison of Ice Core Records with Marine Sediments and Climate Models in **San Feliu**

de Guixols, Spanien. Auskünfte durch: H. Miller, Bemerhaven und Head of the EURESCO Unit, Dr. J. Hendekovic, European Science Foundation, 1 quai Lezay-Marnésia, F-67080 Strasbourg, Tel.: +33-3 88 76 71 35, Fax: +33-3 88 36 69 87, e-mail: euresco@esf.org, <http://www.esf.org/euresco>

6.–8. Oktober: **ISPRS WG I/2, I/5 & IC WG II/IV Workshop “High Resolution Mapping from Space 2003”** in Hannover. Auskünfte durch: WG I/5 Chair Prof. Karsten Jacobsen, Tel.: +49-511-762-2485, Fax: +49-511-762-2483, e-mail: karsten@ipi.uni-hannover.de

6.–8. Oktober: **DFD-Nutzseminar in Neustrelitz**. Auskünfte durch: Dr. Rainer Ressler, Deutsches Fernerkundungszentrum (DFD), Kalkhorstweg 53, 17235 Neustrelitz, Tel.: 03981-480 100, Fax: 03981-480 299, e-mail: Rainer.Ressler@dlr.dr

6.–10. Oktober: **4th International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling in Banff**, Alberta, Kanada. Auskünfte durch: e-mail: 3dimconf@nrc.ca, <http://www.3DIM.conference.org>

8.–10. Oktober: **ISPRS WG III/3 Workshop on Airborne Laserscanning 3-D Reconstruction from Airborne Laser Scanner and InSAR data in Dresden**. Auskünfte durch: WG III/3 Co-Chair Prof. Hans-Gerd Maas, Tel.: +49-351-463-328 59/336 80, Fax: +49-351-463-372 66, e-mail: hmaas@rcs.urz.tu-dresden.de, <http://rcswww.urz.tu-dresden.de/~hmaas/hg-maas.html>

11.–16. Oktober: „**Achieving Climate Predictability using Paleoclimate Data**“. **Euro-Conference** on North Atlantic Climate Variability in **San Feliu de Guixols**, Spanien. Auskünfte durch: T. Stocker, Bern, M. Visbeck, Palisades und: Head of the EURESCO Unit, Dr. J. Hendekovic, European Science Foundation, 1 quai Lezay-Marnésia, F-67080 Strasbourg, Tel.: +33-3 88 76 71 35, Fax: +33-3 88 36 69 87, e-mail: euresco@esf.org, <http://www.esf.org/euresco>

13.–15. Oktober: **Map Asia 2003, 2nd Annual Conference and Exhibition for GIS,**

GPS, Aerial Photography and Remote Sensing in Kuala Lumpur, Malaysia. Auskünfte durch: Map Asia 2003 Secretariat, Malaysian Centre for Remote Sensing (MACRES), No.13, Jalan Tun Ismail, Malaysia, Tel.: 603-2612 2777, Fax: 603-2697 3500, e-mail: info@mapasia.org, www.mapasia.org

15.–18. Oktober: **Meeting of ISPRS WG VI/3 „Geo-Information for Practice“** in Zagreb, Kroatien. Auskünfte durch: Ljerka Rasic, Tel.: +385-1-3657-386, Fax: +385-1-6157-389, e-mail: ljerka.rasic@dgu.tel.hr und WG VI/3 Chair: Ulrike Karin Rivet, e-mail: ulrike@eng.uct.ac.za

21./22. Oktober: **ISPRS Workshop WG VII/6 Monitoring and Modeling of Global Environmental Change – How to link Local with Global ?** in Kyoto. Auskünfte durch: Prof. Yoshifumi Yasuoka, Tel.: +81-3-5452-6409, Fax: +81-3-5452-6408, e-mail: yyasuoka@iis.u-tokyo.ac.jp

25.–30. Oktober: **ASPRS Workshop „Terrain Data: Applications and Visualization Making the Connection“** in Charleston, USA. Auskünfte durch: ASPRS, Tel.: +1-301-493-0290, Fax: +1-301-493-0208, e-mail: asprs@asprs.org, www.asprs.org/asprs/meetings/calendar.html

29.–31. Oktober: International Scientific Conference: **Scientific Research for Sustainable Forest Management** in Bukarest, Rumänien. Auskünfte durch: Claudia Morar, Forest Research and Management Institute (ICAS) Bukarest. Tel./Fax: +04021-240 68 45. e-Mail: claudia@tma.ro, www.icas.ro

3.–7. November: **SEASC 2003 “From Compass & Pacing to Cyber Spacing-How does SE Asian Surveying Measure Up?”** in Hong Kong. Auskünfte durch: The Hong Kong Institute of Surveyors, Congress Secretariat, Fax: 852-2547-9528, e-mail: enquiry@seasc2003hk.org, www.seasc2003hk.org

3.–7. November: **ACRS 2003** in Pusan, Korea. Auskünfte durch: Prof. Choen Kim, Tel.: +82-2-910-4809, e-mail: ksrs@kmu.kookmin.ac.kr, www.aars-acrs.org

- 6./7. November: **International Symposium "Modern Technologies, Education & Professional Practice in the Globalized World"** in Sofia, Bulgarien. Auskünfte durch: Prof. Dr. Eng. Georgi Milev, Tel.: +359-2-700-406, Fax: +359-2-720-841, e-mail: milev@bas.bg
- 6.–8. November: **Denkmäler 3D**, Kolloquium für Denkmalpfleger, Archäologen, Architekten und Geodäten im Rhurlandmuseum Essen. Auskünfte durch: Prof. Heinz-Jürgen Przybilla, Universität Duisburg-Essen, Tel.: 0201-183-7332, Fax: 0201-183-7379, e-mail: przybilla@uni-essen.de, www.vermessung.uni-essen.de
- 10.–14. November: 30th **International Symposium on Remote Sensing of Environment in Honolulu/Hawaii**. Auskünfte durch: ISRSE, e-mail: isrse@email.arizona.edu, oder: Steve Brown, e-mail: brownie@ag.arizona.edu
- 14./15. November: **Architekturfotografie, analog und digital**. Weiterbildungs-Seminar des Instituts für Angewandte Photogrammetrie und Geoinformatik (IAPG) der Fachhochschule Oldenburg/ Ostfriesland/ Wilhelmshaven. Auskünfte durch: FHS Oldenburg, Ofener Str. 16/19, 26121 Oldenburg, www.fh-wilhelmshaven.de/oow/institute/iapg/seminare/.
- 26.–28. November: Kolloquium **Téledétection et Photogrammétrie pour le Développement en milieu Urbain** (Colloque Ville «Pixels et cités» in Marne La Vallee, Frankreich. Auskünfte durch: Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection SFPT, ENSG – 6–8, avenue Blaise Pascal, Cité Descartes, F-77455 Marne La Vallee Cedex 2, Tel.: 01-64-15 32 86, Fax: 01-64-15 32 85, e-mail: sfpt@ensg.ign.fr, http://www.ign.fr/sfpt
- 3.–5. Dezember: **ISPRS Joint Workshop WG II/5 & WG II/6 on Spatial Analysis and Decision Making in Hong Kong**. Auskünfte durch: Prof. Chen Jun, Pres. Com.II, e-mail: chenjun@nsdi.gov.cn oder: Rob Lemmens, Secr.WG II/5, e-mail: lemmens@itc.nl
- 9.–12. Dezember: **ISPRS WG VII/3 Workshop on Integrated Monitoring System in Thiruvananthapuram**, Indien. Auskünfte durch: Shailesh Nayak, Shair WG VII/3, Tel.: +91-79-691 41 41, Fax: +91-79-676 06 26, e-mail: snayakadl@snacharnet.in
- 13.–16. Dezember: **ISPRS WG I/4 International Conference on Advanced Remote Sensing for Earth Observation; Systems, Techniques and Applications in Riyadh**, Saudi-Arabien. Auskünfte durch: Dr. Raad A. Saleh, Tel.: +1-608-238-4825, e-mail: rsaleh@charter.net
- 2004**
- 23.–28. Mai: **FIG Working Week and XXVII General Assembly in Athen**, Griechenland. Auskünfte durch: FIG 2004 Organizing Committee, e-mail: fig2004@tee.gr, http://www.tee.gr/fig2004/
- 24.–28. Mai: **ASPRS Annual Conference in Denver**, CO, USA. Auskünfte durch: http://www.asprs.org
- 25.–27. Mai: 24th **EARSeL Symposium in Dubrovnik**, Kroatien. Auskünfte durch: ear-sel@meteo.fr
- 12.–23. Juli: XXth **ISPRS Congress – Geo Imagery Bridging Continents in Istanbul**, Türkei. Auskünfte durch: Kongressdirektor Prof. Dr. M. Orhan Altan, Tel.: +90-212-285-3810, Fax: +90-212-285-6587, e-mail: oaltan@itu.edu.tr, www.isprs2004-istanbul.com
- 18.–25. Juli: 35th **COSPAR Assembly in Paris**. Auskünfte durch: COSPAR Secretariat, Tel.: +33-1-45250679, Fax: +33-1-40509827, e-mail: cospar@cosparhq.org, http://www.cosparhq.org/
- 20.–24. September: **IEEE/IGARSS 2004 in Anchorage**, USA. Auskünfte durch: Dr. Bill Emery, e-mail: Emery@frodo.colorado.edu, http://ewh.ieee.org/soc/grss/igarss.html
- 13.–15. Oktober: **INTERGEO 2004 in Stuttgart**. Auskünfte durch: www.dvw.de und www.hinte-messe.de

Zum Titelbild/Cover Image



Commander 690 mit Standard CCNS4

Das Titelbild wurde in einem Rockwell Commander 690 aufgenommen. Es zeigt den Piloten FLOYED CUMMINGS während eines Bildfluges mit dem *Standard CCNS4* Flugführungssystem für das Department of Transportation des Staates Washington, USA.

Auf dem Bild ist das neue, von IGI entwickelte, Kontroll- und Anzeigeelement (Command and Display Unit/CDU) zu sehen. Bei dieser neuen CDU wurde die zuvor verwendete Bildröhre durch ein Flachdisplay in TFT-Technik ersetzt. Das Volumen konnte dabei auf 1/10 reduziert werden. Die neue CDU hat die für Fluginstrumente üblichen Maße zur problemlosen Montage im Instrumentenbrett. Alternativ kann es am Steuerhorn oder, wie auf dem Titelbild gezeigt, an der Mittelstrebe der Frontscheibe befestigt werden. Das notwendige Befestigungsmaterial ist in verschiedenen Varianten erhältlich.

Die Bedienung des *Standard CCNS4* wurde durch eine Reduzierung der Anzahl der Bedienungsknöpfe und eine spezielle Form und Anordnung der Drucktasten vereinfacht:

- gelber Knopf: Ein/Aus und Helligkeit
- roter Knopf: Menue-Auswahl und Enter-Taste
- vier Drucktasten für MODE und PAGE sowie ZOOM In/Out.

Auch das IGI *AEROcontrol* System, zur Ermittlung der Elemente der äußeren Orientie-

rung, wird vollständig über die CDU bedient. Eine zusätzliche Tastatur ist nicht erforderlich.

Design, Funktion, Ergonomie, und Bedienung der CDU entsprechen einem Fluginstrument. Zur Durchführung eines Bildfluges ist daher kein speziell ausgebildeter und erfahrener Bildflugpilot erforderlich. Jeder Pilot ist in der Lage die CDU wie ein Fluginstrument zu bedienen.

Das TFT-Display der CDU ist in zwei Teilbereiche gegliedert. Die linke Seite (2/3 der Anzeige) dient der Darstellung von Flugführungsinformationen, die rechte Seite (1/3) ist für Managementaufgaben und Darstellung von Sensorinformationen vorgesehen. Es stehen insgesamt 16 Seiten mit Flug-, Navigations-, und Sensorinformationen zur Verfügung, die über die MODE und PAGE Tasten aufgerufen werden können.

Die Flugführungsinformation besteht im Wesentlichen aus zwei Linien. Die aktuell geflogene Linie befindet sich in der Mitte des Anzeigefeldes (gestrichelt). Zusätzlich wird Magnetic Heading und der geflogene Kurs über Grund (True Track) angezeigt. Die Differenz dieser beiden Werte (unter Berücksichtigung der magnetischen Variation und der flugzeugspezifischen Deviation) ist die Drift, welche zur automatischen Drift-Steuerung einer Sensor-Aufhängung benutzt wird. Die durchgezogene, auf der CDU schräg stehende Linie, stellt die zu fliegende Linie dar.

Das Titelbild zeigt, dass sich das Flugzeug aktuell in einer Kurve befindet. Es wird der Wechsel von einer Fluglinie zur anderen dargestellt. Nach dem Kurvenflug müssen beide Linien (geplante und tatsächlich geflogene) vom Piloten zur Deckung gebracht werden. Hierzu stehen ihm verschiedene Hilfestellungen, wie z.B. die Zoomfunktion oder Markierungspunkte (Marker-Points), zur Verfügung. Steuert der Pilot das Flugzeug in die zuvor mit Toleranzmarken definierte Luftstraße, geht es anschließend „wie auf Schienen durch die Luft“ weiter.

Das neue 5 Zoll TFT-Display von IGI ist kompatibel zu allen schon in Betrieb befindlichen CCNS4-Systemen. Somit ist ein problemloser Umstieg auf die neue CDU Generation möglich.

The cover image shows pilot FLOYED CUMMINGS flying a Rockwell Commander 690 on an aerial photo mission using a *Standard CCNS4* flight-management/guidance system. This task was being carried out for the Department of Transportation, State of Washington, USA.

The picture shows the exciting new development now available from IGI in the form of a new Control and Display Unit (CDU).

With the new CDU the cathode ray tube used before has been replaced by a flat display using TFT technology. The volume of the unit has been reduced by 90% making the dimensions of the new CDU similar to an aircraft instrument. This allows easier installation into any aircraft instrument panel and the ability to mount the monitor closer to the pilot using a control yoke mount or as shown on the cover to be fitted to any part of the aircraft structure. All the various mounting accessories are available upon request.

The operation of the *Standard CCNS4* has been further simplified by a reduction in the number and rearrangement of the control buttons on the CDU:

- Yellow button: On/Off/brightness
- Red button: Menu selection and enter key
- Four push-buttons (MODE/ PAGE and ZOOM In/Out)

In addition IGI's *AEROcontrol* system is used for the calculation and recording of the elements of exterior orientation and can be controlled completely by the CDU during flight. Therefore further operating devices or keyboards are not necessary. The design, function, ergonomics, and operation of the CDU correspond to conventional aircraft instruments allowing the execution of an aerial survey mission without the pilot needing any specific training. Every pilot is now able to operate the CDU as a common aircraft instrument whilst controlling the various systems.

The TFT-display of the CDU is divided into two fields of view. On the left side 2/3

of the screen is used to show guidance information for flight control purposes. On the right side 1/3 of the screen is used for sensor management tasks and further control information. Altogether 16 pages with flight-, navigation- and sensor information are retrievable, which can be called up by the MODE and PAGE keys at anytime.

The guidance information mainly consists of one solid line showing required track with the actual flight path represented by the interrupted line located in the middle of the screen. Additionally Magnetic Heading and the flight course above the earth (True Track) are also displayed. The difference between these two values (magnetic variation and the aircraft specific deviation also taken into account) is the actual drift, which can be used for automatic drift control of a sensor suspension mount.

The cover picture shows that the pilot is actually flying a turnaround manoeuvre and changing from one finished flight line to the next one. Approaching the next flight line, the pilot then guides the aircraft towards the solid line (planned flight path) until that the solid line is covered by the broken line (actual flight path) this allows him/her to accurately fly the required line. As guidance information is updated and displayed real time the zoom function enabled the pilot to zoom in on scale and show even minor deviations off line down to 1 meter. The pilot can then guide the aircraft along a predefined corridor in which a „gap limit“ defines the maximum width of any allowed deviation.

With the position and control of the new CDU much improved the crew can be assured of a reduced workload in the aircraft, which is good news to any crew or manager of an aerial survey operation.

IGI's new 5-inch TFT display is compatible to all CCNS4 systems that are already in operation. For this reason a straight-forward transition to the new CDU generation is possible.

CHRISTIAN GRIMM, IGI mbH
Langenauer Straße 46
57223 Kreuztal, Tel.: +49-2732-5525-0
Fax: +49-2732-5525-25
e-mail: info@igi-ccns.com

XXth Congress

International Society for
Photogrammetry and Remote Sensing



GEO-IMAGERY BRIDGING CONTINENTS

12 - 23 JULY 2004

HELP URGENTLY NEEDED !

We need people to :

- disseminate up to date relevant scientific information
- exchange ideas and experiences effectively

In return, we offer :

- a town bridging continents,
- up to date congress facilities,
- hotels within walking distance to the congress center
- plenary, technical, poster, theme and special sessions
- tutorials and workshops
- technical and social tours
- youth forum sessions

If you think the rewards commensurate with your attendance, please fill the form via the website or enclosed to the second announcement, thus helping to bridge the continents.

IMPORTANT DATES

| | |
|--|-------------------|
| Deadline for submission of abstracts | 20 September 2003 |
| Deadline early fee | 01 December 2003 |
| Deadline for applications for Fellowships to Support Congress Expenses | 31 December 2003 |
| Notification of authors | 01 January 2004 |
| Deadline for registration to Tutorials and Workshops | 30 April 2004 |
| Deadline for submission of full papers | 30 April 2004 |
| Deadline guaranteed hotel reservations | 15 June 2004 |



for more information visit
www.isprs2004-istanbul.com

Prof. Dr. M. Orhan Altan

Director, ISPRS 2004 Congress

Istanbul Technical University, Faculty of Civil Engineering, Dept. of Geodesy & Photogrammetry
34469 Ayazaga, Istanbul, Turkey

Phone: +90 212 285 38 10 Fax: +90 212 285 65 87 E-mail: oaltan@itu.edu.tr



INTERGEO®

Kongress und Fachmesse für Geodäsie,
Geoinformation und Landmanagement



WISSEN FÜR DIE ERDE

17.–19. September 2003

Hamburg Messe und Congress

Experten aus aller Welt...

**...treffen sich auf der weltweit
größten Kongressmesse für
Geodäsie, Geoinformation und
Landmanagement**

- Vermessungsgeräte und Zubehör
- Mobile GIS/Internet
- Location Based Services

Informationen unter:

www.intergeo.de

Fachmesse

HINTE Messe- und
Ausstellungs-GmbH
Griesbachstraße 10
D-76185 Karlsruhe
Tel. ++49 (0)721/931 33-0
info@hinte-messe.de



Kongress

Örtlicher
Vorbereitungsausschuss
Postfach 10 18 20
D-20012 Hamburg
Tel. ++49 (0)40/428 26 55 60
info@intergeo2003.de

3. Oldenburger 3D-Tage

Optische 3D-Messtechnik
Photogrammetrie
Laserscanning

**Oldenburg (Oldb.)
28./29. Januar 2004**

Organisation:

Institut für Angewandte Photogrammetrie
und Geoinformatik (IAPG)
FH Oldenburg/Ostfriesland/Wilhelmshaven

Arbeitskreis Nahbereichsphotogrammetrie
Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie,
Fernerkundung und Geoinformation (DGPF)

**Weitere Informationen unter
www.fh-oow.de/3dtage**

**Letzter Termin zur Einreichung
eines Vortrages: 14.11.2003**

Photogrammeter

25jährige Berufserfahrung, seit 1992 mit
eigenen Auswertegerät freiberuflich tätig,
hat noch Kapazitäten frei.

Anfragen unter:

Hartwig Müller Luftbildvermessung
Stellenbergstraße 18
D-58119 Hagen
Tel.: 02331/441 790 oder
Mobil: 0172/2682456

| |
|-------------------------|
| Neuerscheinungen |
|-------------------------|

MANFRED BAUER, 2003: Vermessung und Ortung mit Satelliten. GPS und andere satellitengestützte Navigationssysteme. Mit Beiträgen von LAMBERT WANNINGER. 5., neu bearbeitete und erweiterte Auflage. XII, 392 S., Kartoniert. Herbert Wichmann, Hüthig Fachverlage, Heidelberg (www.huethig.de). Bestellungen: e-mail kundenservice@hue-thig.de ISBN 3-87907-360-0, € 62,-

GÜNTER CHESI & THOMAS WEINHOLD, (Hrsg.), 2003: 12. Internationale Geodätische Woche Obergurgl 2003. VIII, 265 S., Kartoniert. Herbert Wichmann, Hüthig Fachverlage, Heidelberg (www.huethig.de). Bestellungen: e-mail kundenservice@hue-thig.de ISBN 3-87907-401-1, € 42,-

EDGAR FALKNER & DENNIS D. MORGAN, 2002: Aerial Mapping. Methods and Applications. 2nd Edit. Catalog no. L1557. 216 S., Lewis Publishers, CRC PRESS, www.crcpress.com, ISBN: 1-5667-0557-6. US \$ 99,95

PAUL MAC BERTHOUEX & LINFIELD C. BROWN, 2002: Statistics for Environmental Engineers. 2nd Edit. Catalog no. L1592. 512 S., Lewis Publishers, CRC PRESS, www.crcpress.com, ISBN: 1-56670-592-4. US \$ 99,95

DAVID RICH, 2002: Rational Management and Display of Site Environmental Data. Catalog no. L1591. 448 S., Lewis Publishers, CRC PRESS, www.crcpress.com, ISBN: 1-5667-0591-6. US \$ 119,95

JOHN C. RUSS, 2002: The Image Processing Handbook. 4th Edit. Catalog no. 1142. 744 S., Lewis Publishers, CRC PRESS, www.crcpress.com, ISBN: 0-8493-1142-X. US \$ 139,95

STEVEN E. FRANKLIN, 2001: Remote Sensing for Sustainable Forest Management.

Catalog no. L1394. 424 S., Lewis Publishers, CRC PRESS, www.crcpress.com, ISBN: 1-5667-0394-8. US \$ 99,95

ROBERT R. HOFFMAN & ARTHUR B. MARKMAN, (Edit.), 2001: Interpreting Remote Sensing Imagery: Human Factors. Catalog no. L1413. 304 S., Lewis Publishers, CRC PRESS, www.crcpress.com, ISBN: 1-5667-0413-8. US \$ 94,95

JAMES D. TAYLOR, (Edit.), 2001: Ultra-Wideband Radar Technology. Catalog no. 4267. 448 S., Lewis Publishers, CRC PRESS, www.crcpress.com, ISBN: 0-8493-4267-8. US \$ 119,95

RICHARD BITTER, MATTHEW NAWROCKI & TAQI MOHIUDDIN, 2001: LabVIEW – Advanced Programming Techniques. Catalog no. 2049. 456 S., Lewis Publishers, CRC PRESS, www.crcpress.com, ISBN: 0-8493-2049-6. US \$ 94,95

LUCIANO DA FONT COSTA & ROBERTO MARCOND CESAR, 2001: Shape Analysis and Classification: Theory and Practice. Catalog no. 3493. 680 S., Lewis Publishers, CRC PRESS, www.crcpress.com, ISBN: 0-8493-3493-4. US \$ 99,95

DONAT P. HADER, (Edit.), 2001: Image Analysis. Methods and Applications. 2nd Edit. Catalog no. 239. 480 S., Lewis Publishers, CRC PRESS, www.crcpress.com, ISBN: 0-8493-0239-0. US \$ 149,95

DAVID HOLLAND, BOB GUILFORD & KEITH MURRAY, 2002: OEEPE-Project on Topographic Mapping from High Resolution Space Sensors. OEEPE Publ. No. 44, 160 S., ISSN 0257-0505 und ISBN 3-89888-865-7. Bestellung bei: www.oeepe.org oder BKG, Abt. Geoinformationswesen, Richard-Strauss-Allee 11, D-60598 Frankfurt am Main.

NIKOLAS PRECHTEL, (Hrsg.), 2002: Geoinformationssysteme – Theorie, Anwendungen, Problemlösungen. Vorträge der 7. Dresdner Sommerschule am 26./27. September 2002 an der TU Dresden. Kartographische Bausteine Bd. 21. 142 Seiten, mit CD ROM. Kartoniert. Bezug über TU Dresden, Institut für Kartographie, 01062 Dresden. ISBN: 3-86005-355-8

ARTHUR L. ALLEN, 2003: Maths for Map Makers. 2nd and enlarged edition. 234 mm x 156 mm, 384pp, liberally illustrated, paperback. Bezug: BookSource, 32 Finlas Street, Glasgow, G22 5DU, UK. Customer services: 0870 240 2182, Fax: +44-141-557 0189, e-mail: customerservices@booksource.net, www.whittlespublishing.com, £ 30.

RON GRAHAM, 2003: The Digital Image. 2nd completely revised and updated edition. 234 mm x 156 mm, 240pp, liberally illustrated with a colour section, paperback. Bezug: BookSource, 32 Finlas Street, Glasgow, G22 5DU, UK. Customer services: 0870 240 2182, Fax: +44-141-557 0189, e-mail: customerservices@booksource.net www.whittlespublishing.com, £ 40.

JAMES MCCARTHY, 2003: Journey into Africa. The Life and Death of Keith Johnston, Scottish Cartographer and Explorer (1844–79). 240 mm × 170 mm, 256pp, liberally illustrated, paperback. Bezug: BookSource, 32 Finlas Street, Glasgow, G22 5DU, UK. Customer services: 0870 240 2182, Fax: +44-141-557 0189, e-mail: customerservices@booksource.net www.whittlespublishing.com, £ 35.