

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 Stetoskop (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 Bodenauflösung 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-

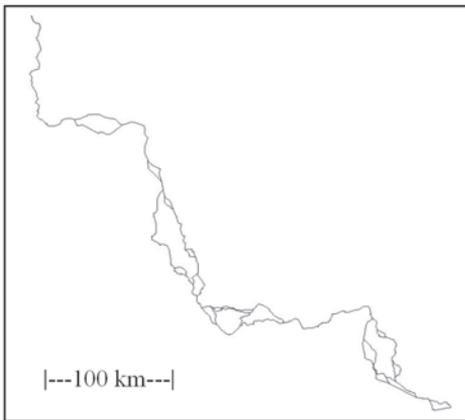


Abb. 8: Pipeline-Trasse (ca. 650 km).

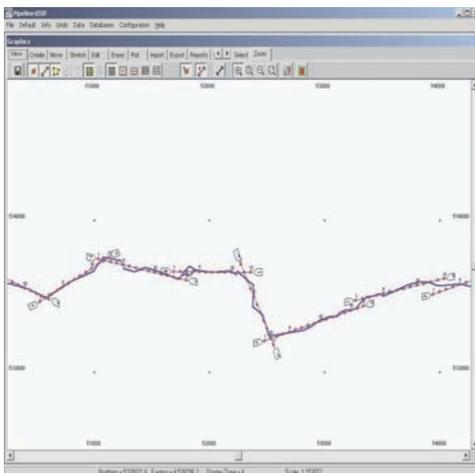


Abb. 9: Ausschnitt Pipeline-Flugplanung. (Software WinMP, IGI).

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