

Aerotriangulation: auch für den ADS40 Luftbildsensor?*

FRANÇOIS GERVAIX, Singapur

Zusammenfassung: Der ADS40 Sensor zeichnet digitale Luftbilder mit geometrischer und spektraler Genauigkeit auf und eröffnet dadurch der digitalen Bildanalyse neue Perspektiven. Die Georeferenzierung mittels GPS & IMU Daten ist für die meisten Fernerkundungsaufgaben ausreichend. Die photogrammetrischen Anforderungen bezüglich relativer und absoluter Genauigkeit können aber nur mit Hilfe der Aerotriangulation erfüllt werden.

Summary: *Aerotriangulation: Does the ADS40 Sensor require aerial triangulation?* The imagery generated by the LH Systems ADS40, combining geometric and spectral precision, opens new perspectives in digital image analysis. Even though the georeferencing determined by GPS & IMU is good enough for remote sensing applications, aerial triangulation remains irreplaceable to satisfy the accuracy and reliability requirements of photogrammetry.

Einleitung

Der digitale Luftbildsensor ADS40 wurde am XIX. Kongress der ISPRS in Amsterdam im Juli 2000 vorgestellt. Diese gemeinsame Entwicklung des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt DLR (German Space Center) und LH Systems, ist der erste Luftbildsensor, welcher der hohen Leistung filmbasierter Luftbildkameras des Formats 23 cm × 23 cm bezüglich Auflösung und Flächendeckung nahe kommt. Dieses innovative Produkt eröffnet neue Möglichkeiten für die vollständig digitale Photogrammetrie. Digitale Kameras mit Flächensensoren werden seit längerer Zeit versuchsweise für Luftbildaufnahmen verwendet. Aber wegen des kleinen Formats der Flächensensoren (2000 × 3000 Pixel bzw. 6 Megapixel) ist die flächendeckende Leistung stark eingeschränkt. Dieser Nachteil muss mit vielen Fluglinien und einer grossen Anzahl Luftbilder kompensiert werden, was diese Lösung für die Photogrammetrie unwirtschaft-

lich macht. Deshalb ist der Sensor ADS40, welcher der hohen Leistungsanforderung der Photogrammetrie gerecht wird und der die direkte Aufnahme digitaler Luftbildstreifen mit hervorragender Radiometrie, sowie den vollständig digitalen Datenfluss ermöglicht, ein wesentlicher Fortschritt.

Der digitale Luftbildsensor ADS40 stellt aber noch eine weitere Neuerung dar. Er erfüllt nicht nur die bekannten Standards der Auflösung und flächendeckenden Leistung, sondern ermöglicht auch multispektrale Bilder aufzunehmen, welche die Bedürfnisse der Anwender in der Fernerkundung erfüllen. Die Kombination von photogrammetrischer Genauigkeit (Georeferenzierung) mit dem Potenzial der Bildanalyse und der Interpretation digitaler Bilder (Klassifikation) ist neu, vielversprechend und aufregend. Parallel zur ADS40 entwickelt eine andere Firma einen anderen Typ eines digitalen Sensors. Dieser besteht aus einer Gruppe von digitalen, flächensensor-bestückten Kameras und deren Bilder werden durch spezielle Verarbeitungsprogramme zusammengefügt. Der Luftbildsensor ADS40 ist völlig anders konzipiert. Eine

* Aus dem Französischen übersetzt von ALAIN CHAPUIS und PETER FRICKER

kurze Zusammenfassung soll ausschliesslich die geometrischen Aspekte erläutern, da diese für den Inhalt dieses Artikels wichtiger sind als mechanische, elektronische oder optische Aspekte.

Konzept

Das Grundprinzip des Dreizeilen Scanners wurde durch Dr.-Ing. OTTO HOFMANN um 1970 definiert.

Die drei Zeilensensoren sind in der Fokalebene rechtwinklig zur Flugrichtung angeordnet. Je eine Zeile schaut in Flugrichtung vorwärts, senkrecht und nach hinten. Dadurch werden alle Objekte entlang eines Flugstreifens kontinuierlich in drei Bildstreifen und aus unterschiedlichem Blickwinkel aufgezeichnet. Dies eröffnet neue Möglichkeiten in der photogrammetrischen Auswertung. In der klassischen, zentralperspektiven Luftaufnahme werden bei 60% Längsüberdeckung nur 50% aller Objekte dreifach aufgezeichnet. Die 78 mm langen panchromatischen Doppelzeilen des ADS40 Sensors haben 12000 Pixel und sind gegeneinander um ein halbes Pixel versetzt (3.25 μm). Dadurch wird mit einer Doppelzeile eine Informationsdichte erreicht, welcher einer Auflösung einer 24000 Pixel Zeile entspricht. Die Fokalebene enthält noch vier weitere Einzel-Zeilen mit je 12000 Pixel, welche kombiniert mit Interferenz-Filtern die Bilder in den Spektralbereichen Rot,

Grün, Blau (RGB) und Nahes Infrarot (NIR) aufzeichnen. Das „Trichroid“, ein Strahlteiler mit geringem Energieverlust, erlaubt die gleichzeitige Aufzeichnung der Boden-Reflektanz eines Objektraums durch die drei Zeilen R,G,B, obwohl die drei Zeilen physisch in der Fokalebene mit 2.2 mm Zwischenraum angeordnet sind (Abb. 1).

Dank der telezentrischen Optik registrieren die spektralen CCD-Zeilen über den ganzen Schwad in den definierten Spektralbändern. Dies ist wichtig für die Verwendung der Daten im Fernerkundungsbereich. Der Luftbildsensor ADS40 wird im Flugzeug in die bewährte, kreiselstabilisierte Aufhängung PAV30 installiert, genau wie die filmbasierte Luftbildkamera RC30. Die Aufzeichnung der Daten und die unmittelbar nachfolgende Verarbeitung unterscheiden sich sehr stark vom Arbeitsfluss in der klassischen Photogrammetrie. Danach aber ist die Benutzung der direkt-digitalen und der klassischen, gescannte Daten in den Digitalen Photogrammetrischen Arbeitsstationen (Socet Set[®] Photogrammetrie Software) bis hin zur Aerotriangulation (Bündelblockausgleichung mit ORIMA) ähnlich.

Verfahren

Die Größe des Bodenpixels (auch GSD oder Ground Sample Distance genannt) wird bestimmt durch die Flughöhe, die Geschwindigkeit über Grund und die Zykluszeit des



Abb. 1: Adriaküste, Italien. Farbkomposit, panchromatische Nadiraufnahme und Falschfarbkomposit. Flughöhe ü. Grund = 1500 m, Bodenpixel = 15 cm. Alle Bildstreifen entsprechen 12K \times 70K, 18.9 km²; Gezeigte Ausschnitte 12K \times 14K, 3.8 km².

Sensors (Intervall für Aufzeichnung und Auslesung der CCD Zeilen). Die Flughöhe bestimmt die „Breite“ eines Pixels, während sich die „Länge“ durch die Geschwindigkeit des Flugzeuges multipliziert mit der Zykluszeit ergibt. Typische Flugparameter sind: GSD Schwarz/Weiss = 15 cm und Spektral = 30 cm; Fluggeschwindigkeit = 70 m/s; Flughöhe über Grund = 3000 m, Zykluszeit Schwarz/Weiss 2.5 ms, Spektral = 5 ms; Schwadbreite = 3.6 km. Die kürzeste Zykluszeit des Sensors ADS40 beträgt 1.25 ms (800 Hz).

Die komprimierten Daten, ungefähr 100 GB pro Stunde, werden während des Fluges durch die Steuereinheit (CU40) auf den speziell für den Flug konzipierten Festplatten-Massenspeicher (MM40) übertragen. Sollte ein Projekt 500 GB übersteigen, kann der Massenspeicher MM40 während des Fluges ausgetauscht werden. Zur Weiterverarbeitung der Daten wird einzig der Massenspeicher MM40 ins Büro transportiert. Die Übertragung der Daten vom Massenspeicher zum Bürorechner erfolgt über eine SCSI Schnittstelle, gesteuert durch ein entsprechendes Programm von LH Systems. Die Daten werden dabei dekomprimiert und separiert als Bilder (normalerweise im TIFF Format), Meta-Daten und POS-Daten abgelegt. Mit den POS-Daten können die während des Fluges eingenommene Position und Fluglage jeder Zeile im Bildstreifen rekonstruiert werden. Die Kombination von Positionsmessungen (GPS) mit Lagemessungen (Inertialsystem IMU) erlaubt es, die genaue Flugbahn zu errechnen. Die Messfrequenz ist 200 Hz. Diese hohe Rate ist notwendig, da der ADS40 Sensor die Bilddaten mit bis zu 800 Hz (1.25 ms) aufzeichnet. Im ersten Datenverarbeitungsschritt wird die Flugbahn mit Hilfe des Programms POSpac von Applanix berechnet. Die Erfahrung hat gezeigt, dass diese Flugbahnberechnung sehr sorgfältig durchgeführt werden muss. Dies gilt sowohl für den Fall der klassischen Photogrammetrie mit GPS (kinematisch-differenziell), wie auch für die kombinierte Berechnung von GPS und IMU. Als Nächstes werden die Bilder mittels Synchronisationsdaten mit der Flugbahn verknüpft.

Wird die x und y Koordinate jedes auf der Fokalebene kalibrierten Pixels in die Berechnung einbezogen, ist die Georeferenzierung jedes Pixels gegeben. Im Weiteren werden die Rohbilder entzerrt, indem jedem Pixel seine relative Lage zugeordnet wird. Dazu können die Pixel auf eine Ebene mittlerer Höhe (Vereinfachung) oder auf ein digitales Geländemodell projiziert werden. Betrachtet man ein entzerrtes Bild in Socet Set[®] unterscheidet es sich nicht von herkömmlichen, gescannten Bildern. Allerdings ist die Radiometrie besser: in der ADS40 werden die panchromatischen Zeilen mit 16 Bit Dynamik aufgezeichnet, wodurch sich ein wirklicher dynamischer Bereich zwischen 11 und 13 Bit ergibt. Während der Entzerrung kann dieser Bereich auf 8 Bit reduziert werden. Die RGB und NIR Zeilen werden immer auf 8 Bit reduziert und zu 24 Bit Drei-Farben-Kompositen zusammengefügt.

Ein weiterer, wesentlicher Unterschied zwischen ADS und herkömmlichen Luftbildern besteht in der Ausdehnung der Bilder. Im hochauflösenden panchromatischen „Schwad“ sind 24000 Pixel vorhanden und im multispektralen (RGB und NIR) sind es 12000 Pixel. Um eine ähnliche Leistung mit einer Reihenkamera zu erreichen, müsste das Gebiet in einem Bildmasstab von 1:10000 geflogen und die Bilder anschließend mit 12.5 µm gescannt werden. Zur Aufnahme wäre mit einem 15 cm Objektiv eine Flughöhe von 1500 m über Grund notwendig und ein Bild würde im Gelände 2.3 km × 2.3 km erfassen. Bei gleicher Schwadbreite für Reihenkamera und ADS40 ist die Bildlänge jedoch völlig unterschiedlich. Für den Luftbildsensor ADS40 ist sie so lange wie die Fluglinie oder theoretisch unendlich lange! Während unserer Testflüge im Frühjahr 2001 war die längste Fluglinie 132000 Pixel. Bei einer GSD von 15 cm ergab sich ein Bildstreifen von 19.8 km Länge. Die Flugzeit war 5'30" bei einer Fluggeschwindigkeit von 115 Knoten.

Drei panchromatische Bildstreifen aus drei Sichtwinkeln wurden gleichzeitig aufgezeichnet und anschließend individuell georeferenziert (Abb. 2).

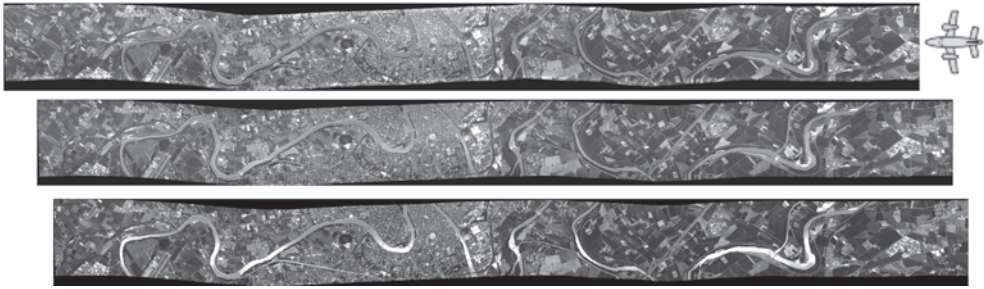


Abb. 2: Verona, Italien. Panchromatische Vorwärts-, Nadir- und Rückwärts-Sicht. Flughöhe über Grund = 1500 m, Bodenpixel (GSD) = 15 cm, 12K × 132K, 35.6 km².

Diese Bildstreifen können stereoskopisch betrachtet werden. Die Qualität in der Stereobetrachtung ist ausreichend für Anwendungen, welche in Socet Set[®] mit einer Minifizierung von 4:1 möglich sind. Bei größerem Betrachtungsmaßstab werden störende Restparallaxen sichtbar. Deshalb ist für Anwendungen höchster Genauigkeit (ca. $0.7 \times \text{GSD}$) die Aerotriangulation unabhängigbar.

Prinzip der Aerotriangulation

Die Hauptziele der Aerotriangulation (siehe auch HINSKEN et al. 2001 und GREENING et al. 2001) sind:

- Feinbestimmung der Achsen
 - Bestimmung der Ausrichtung zwischen Sensor-Achse und IMU-Achsen
 - Bestimmung des Hauptpunktes
- Überprüfung der Sensorkalibrierung
 - Blickwinkel jedes Pixels
 - ◇ Kammerkonstante
 - ◇ Verzeichnung
 - ◇ Lage der CCD Zeilen
- Zuverlässigkeit
 - Zusätzliche Redundanz dank der Verknüpfungspunkte
 - Unabhängige Kontrolle der GPS- und IMU-Daten
 - Beste Geländeanpassung dank der Passpunkte
 - Einführung von Parametern um Datumsdifferenzen zwischen GPS Daten des Fluges und der Boden-Passpunkte zu kompensieren

- Kostenreduktion der ADS40
 - Einsatz einer günstigeren, weniger genauen IMU.

Die anerkannte und erprobte Software ORIMA wurde um das ADS40-Sensormodell erweitert, um der spezifischen Geometrie der Bilder Rechnung zu tragen.

Die Vorbereitung eines ADS40-Blocks ist sehr ähnlich zu der eines herkömmlichen Blocks: Import der Unterstützungsdatei, Import der Passpunkte, Bestimmung der Verteilung der Verknüpfungspunkte, automatische Messung der Verknüpfungspunkte, halbautomatische Messung der Passpunkte, Bündelausgleichung mit zusätzlichen Parametern und Bildung von ausgeglichenen Unterstützungs- und Kalibrierungs-Dateien.

Was wird eigentlich ausgeglichen, da es kein Projektionszentrum und keine externe Orientierung mehr gibt?

Dank der Art wie die ADS40 die Bilder aufzeichnet, ist ein Bildstreifen ein sehr homogenes Gebilde, denn er wird von der ersten Zeile an kontinuierlich zusammengesetzt. Es gibt keine plötzliche Änderung oder Unstetigkeit. Betrachtet man jedoch die oben aufgeführte Aufzeichnungsdauer und die Länge der Fluglinien, sind geringe Änderungen wie Drift und sonstige systematische Abweichungen zu erwarten.

Es sei daran erinnert, dass die Bilder mit bis zu 800 Hz erfasst werden, dass die Inertialmessungen mit 200 Hz und dass die GPS-Messungen mit 2 Hz erfolgen. Deshalb

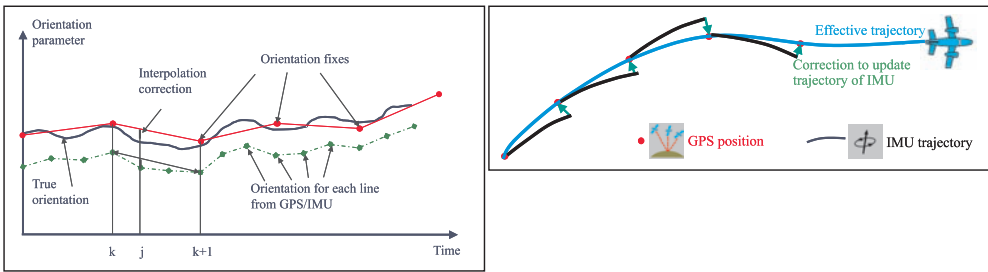


Abb. 3: Prinzip der Ausgleichung der Orientierungsparameter. Bild: 800 Hz, IMU: 200 Hz, GPS: 2 Hz, Triangulation: 0.2 Hz.

ist es wünschenswert, eine übergreifende, unabhängige Verknüpfung der Messungen zu haben (Abb. 3).

Diese übergreifende Verknüpfung wird idealerweise mit Aerotriangulation gemacht. Beim Import der Bildstreifen werden auf der Flugbahn in regelmäßigen Abständen Orientierungs-Fixpunkte (OF) bestimmt. Das Intervall hängt unter anderem ab von der IMU und der Distanz zwischen der Nadir- und Rückwärtszeile (2400 Pixel). Die Abhängigkeit von der IMU ist verständlich. Wie allgemein bekannt ist, driftet eine IMU über die Zeit. Die Abhängigkeit von der Distanz zwischen der Nadir- und der Rückwärtszeile ist spezifisch für Dreizeilen Scanner.

Wie oben erwähnt, wird mit der ADS40 das Gelände 3-fach durch panchromatische Zeilen aufgenommen. Im Unterschied zur Filmkamera sind die Blickwinkel in Flugrichtung durch Anordnung der Zeilen auf

der Fokalebene festgelegt, d.h. 0° für die Nadir-Szene, 14° für die Rückwärts-Szene und 28° für die Vorwärts-Szene. Die stereoskopische Betrachtung ist für jeden Punkt möglich unter einem Winkel von 14° (Nadir-Rückwärts), 28° (Vorwärts – Nadir) oder 42° (Vorwärts – Rückwärts) in Funktion der Textur und der Topographie. Der seitliche Einblickwinkel liegt zwischen 0° und 32° (Abb. 4).

Im Rahmen der Aerotriangulation wird jeder Verknüpfungspunkt entsprechend dieser drei Winkel gemessen. Der Ursprung der einfallenden Strahlenbündel ist nicht das Projektionszentrum x und $x + 1$ wie bei den klassischen Aufnahmen. Der Ursprung des Vorwärts-Strahlenbündels liegt zwischen den Orientierungs-Fixpunkten y und $y + 1$. Der Ursprung des Nadir-Strahlenbündels liegt idealerweise zwischen OF $y + 2$ und $y + 3$. Der Ursprung des Rückwärts-Strahlenbündels liegt zwischen OF $y + 3$ und



Abb. 4: Shinjuku, Tokyo, Japan. Panchromatische Bilder, Rückwärts, Nadir und Vorwärts. Flughöhe = 2000 m über Grund, GSD = 20 cm. Gesamtbild $12K \times 53K$, 25.4 km^2 ; gezeigte Ausschnitte 1120×1320 , 5.9 ha .

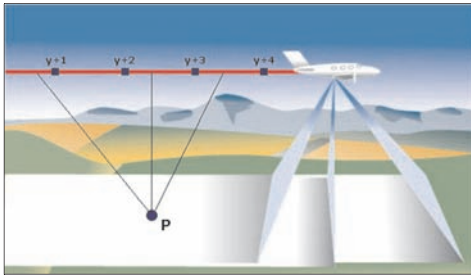


Abb. 5: Fünf Orientierungs-Fixpunkte tragen zur Bestimmung eines einzelnen Verknüpfungspunktes bei.

$y + 4$ (die Vorwärtsbasis ist zweimal länger als die Rückwärtsbasis). Somit werden für die Bestimmung eines einzigen Verknüpfungspunktes fünf OF berücksichtigt (Abb. 5).

Es bleibt nur noch, genügend Verknüpfungspunkte zu messen. Zu diesem Zweck wird eine Punktverteilung in Funktion des semi-variablen Bildformates erzeugt. Die Verteilung in y Richtung ist klar definiert (12000, beziehungsweise 24000 Pixel). Punkte werden oben, in der Mitte und unten im Bildstreifen bestimmt. Die Verteilung in x -Richtung ist veränderlich, die Verteilung wird so wiederholt, dass 2×3 Punkte zwischen zwei angrenzenden OF zu liegen kommen. Diese Punktverteilung hat eine gewisse Ähnlichkeit mit derjenigen von OTTO VON GRUBER. Es ist zusätzlich möglich, die Punktdichte durch Cluster, mehr Linien, usw. zu vergrößern.

Ergebnisse

Die Flugkampagne im Frühjahr 2001, durchgeführt in der Schweiz, in Japan und Italien hat gezeigt, dass die Genauigkeit nach der Ausgleichung zwischen $1/3$ und $2/3$ GSD (Sigma Null, σ_0) liegt. Die Lagegenauigkeit entspricht den beobachteten Restfehlern auf den Passpunkten. Die Werte für die Höhengenaugkeit sind ungefähr zweimal größer. Dank der Georeferenzierung (bestimmt aus GPS & IMU Daten) sind Querstreifen im Block nicht notwendig, außer eine zuverlässige Selbstkalibrierung wird angestrebt. Erstaunlicherweise sind

keine Boden-Passpunkte notwendig wenn keine Datumsangleichung mit den im Flug bestimmten GPS Punkten gemacht werden soll. Grundsätzlich genügt die Verwendung von Verknüpfungspunkten um die Restparallaxe zu eliminieren. Trotzdem wird dieses Vorgehen aber nicht empfohlen. Eine minimale Anzahl Passpunkte sollte immer gemessen werden. Nur so kann die Qualität der GPS Georeferenz überprüft werden.

Die symmetrische Verteilung und das sich wiederholende Muster der Verknüpfungspunkte erlaubt es auf einfache Art, die Punkte zu isolieren und zu prüfen, welche in der Korrelation nicht zufrieden stellend waren. Die grafischen und numerischen Funktionen von ORIMA ermöglichen eine sehr rationelle Analyse des triangulierten Blocks. Die Handhabung von ORIMA erweitert für die Aerotriangulation von ADS40 Daten ist sehr ähnlich zu ORIMA für die klassische Aerotriangulation. Somit wird die Lernphase kurz.

Perspektiven

Panchromatische Bildstreifen mit ausgeglichener Geometrie ermöglichen eine Vielzahl von spektralen und geometrischen Kombinationen. Zum Beispiel können die hochauflösten panchromatischen Bilder mit den Daten standardmässig aufgelöster RGB Bilder „eingefärbt“ werden. Es sei daran erinnert, dass die RGB Bilder leicht kombinierbar sind, weil die einzelnen Spektralbänder aus demselben Strahlenbündel stammen. Die meisten Anwendungen verlangen eine genaue Entzerrung, deswegen ist ein digitales Höhenmodell notwendig. Dieses Höhenmodell kann leicht nach der ersten Georeferenzierung abgeleitet werden.

Das Kombinationspotenzial der ADS40 Bilddaten eröffnet neue Perspektiven, ist spannend und vielversprechend.

Literatur

GREENING, W.J.T. et al., 2001: The proper use of directly observed orientation data: aerial triangulation is not obsolete, ASPRS, St. Louis, USA, 2001

- HINSKEN, L. et al., 2001: Triangulation of LH Systems' ADS40 using ORIMA, ASPRS, St. Louis, USA, 2001
- SANDBAU, R. et al., 2000: Design principles of the LH Systems ADS40 Airborne Digital Sensor. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 33, Part B1, Amsterdam, Netherlands, pp. 258–265.
- TEMPELMANN, U. et al., 2000: Photogrammetric software for the LH Systems ADS40 Airborne Digital Sensor. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 33, Part B2, Amsterdam, Netherlands, pp. 552–559.
- Anschrift des Verfassers:
Dipl.-Ing. FRANÇOIS GERVAIX,
LH Systems, Airborne Systems, Asia-Pacific
Region, GIS & Mapping Division
Leica Geosystems (S'pore) Pte Ltd
8 Pandan Crescent #02-04, UE Tech Park,
Singapore 128466
e-mail: gervaix@lh-systems.com
- Manuskript eingegangen: Januar 2002
Angenommen: Januar 2002