

Georreferenciación GPS/INS de imágenes aéreas adquiridas con escáneres rotacionales: ejemplo práctico y resultados

Cristina Portalés, José Luis Lerma
Escuela Técnica Superior de Ingeniería Geodésica, Cartográfica y Topográfica
Universidad Politécnica de Valencia. Camino de Vera, s/n. 46022 Valencia

1. INTRODUCCIÓN

La georreferenciación de imágenes aéreas para la producción de ortoimágenes exige el conocimiento de los seis parámetros de orientación externa de la cámara (X_L , Y_L , Z_L , ϕ_L , θ_L , ψ_L). Tradicionalmente, la determinación de estos parámetros se ha llevado a término de manera indirecta utilizando puntos de apoyo medidos sobre el terreno. Con la reciente introducción de escáneres aerotransportados, este proceso ya no es viable debido a la gran cantidad de apoyo que se precisa. La utilización de sistemas integrados GPS/INS montados en el aeroplano solucionan la problemática anterior, ya que proporcionan, de manera directa, los parámetros de orientación externa. En este artículo se introducen algunos conceptos básicos sobre los sensores rotacionales y se explican, por un lado, los principios de la integración de estos tres sensores (escáner, GPS, INS), y por otro, la georreferenciación de imágenes lineales aerotransportadas obtenidas a partir de un escáner rotacional. Además, se muestran los resultados alcanzados en la imagen tras el proceso de ortorrectificación.

2. ESCÁNERES ROTACIONALES

Los escáneres rotacionales se basan en el principio de la digitalización línea a línea de la superficie terrestre como consecuencia de la rotación de un prisma. Estas líneas encajan entre sí formando una matriz de píxeles (figura 1).

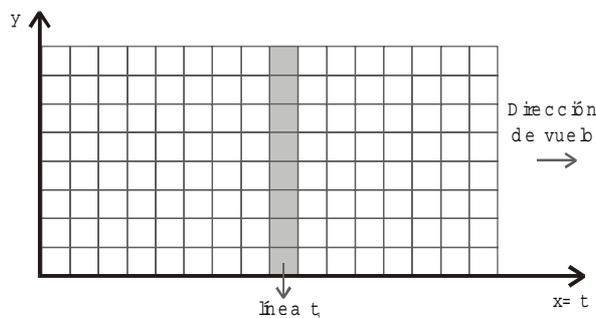


Figura 1: Imagen de un escáner rotacional

La señal recibida se digitaliza en intervalos de tiempo constantes. Por consiguiente, la huella (proyección del píxel sobre el terreno) es mayor en los bordes de la imagen que en el centro. Sin embargo, los píxeles en la imagen original son de igual magnitud, lo que significa que existe una compresión que actúa desde el centro hacia los bordes. Este efecto de “distorsión panorámica” se corrige mediante una “corrección panorámica” con el fin de obtener las condiciones de una perspectiva central [Kraus, 1994].

3. GEORREFERENCIACIÓN DE IMÁGENES AÉREAS

La georreferenciación de imágenes aéreas es un proceso que consta de dos fases. En primer lugar, el sensor se orienta; este proceso incluye la determinación de la orientación externa. En segundo lugar, la imagen original se relaciona con el sistema terreno mediante un proceso denominado remuestreo. La imagen que se obtiene de este modo la denominamos imagen georreferenciada u ortoimagen.

3.1. Primera fase: *Parámetros de orientación externa*

Los parámetros de orientación externa pueden calcularse utilizando métodos directos, indirectos o mixtos. Los observables en el método indirecto son las coordenadas de los puntos de paso y de apoyo. En el método directo se requiere básicamente de las observaciones del sistema GPS/INS integrado. En este caso, la ecuación de georreferenciación es [Skaloud, 1999]:

$$\mathbf{r}_i^m = \mathbf{r}_{ins/gps}^m(t) + \mathbf{R}_b^m(t)(s_i \mathbf{R}_c^b \mathbf{r}_i^c(t) + \mathbf{r}^b) \quad (1)$$

donde:

\mathbf{r}_i^m	Vector de coordenadas de un punto “i” en el sistema de coordenadas terreno “m”
$\mathbf{r}_{ins/gps}^m(t)$	Vector de coordenadas terreno del INS en el sistema de coordenadas terreno “m”, determinado por la integración INS/GPS
$\mathbf{R}_b^m(t)$	Matriz rotación del cuerpo INS “b” al sistema “m”
s_i	Factor de escala entre los sistemas terreno e imagen para un punto “i”
\mathbf{R}_c^b	Matriz de rotación entre la cámara “c” y el cuerpo INS “b”
$\mathbf{r}_i^c(t)$	Vector de coordenadas imagen “c” de un punto “i”
\mathbf{r}^b	Vector de traslación entre el INS y el centro de la cámara en el sistema INS “b”

La situación espacial de estos valores quedan representados en la figura 2:

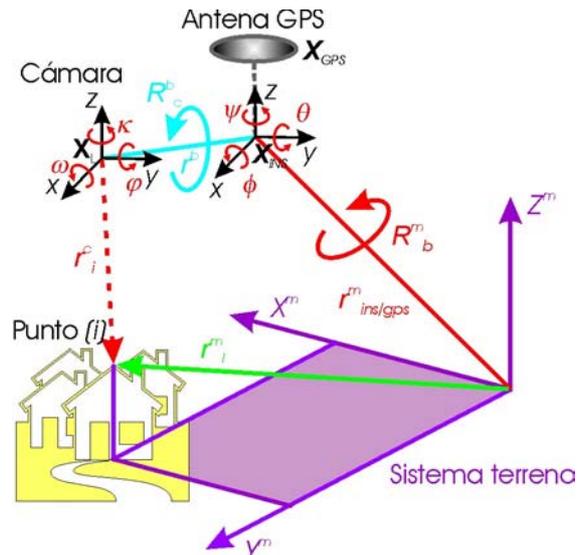


Figura 2: Elementos de georreferenciación con GPS/INS

Si disponemos y utilizamos conjuntamente datos GPS/INS y puntos de paso y de apoyo, entonces nos referimos al denominado método mixto o combinado. Este último método es el que vamos a desarrollar.

3.1.1. Sistema integrado GPS/INS

La combinación de datos GPS/INS en un sistema integrado incrementa la precisión global y fiabilidad de ambas fuentes. Esto es debido a que las características del GPS y del INS son radicalmente distintas [Lerma J.L., 2002]. Por un lado, la alta estabilidad del INS en periodos de tiempo cortos suaviza los errores de observación del GPS. Por otro lado, la alta estabilidad del GPS en periodos largos ayuda a compensar los errores sistemáticos y temporales del INS. La integración óptima de datos GPS e INS se consigue gracias al uso de filtros Kalman.

3.1.2. Principio de modelización de la trayectoria del avión por medio de funciones de orientación

La modelización de la variación de los seis parámetros de orientación externa a lo largo de la trayectoria del vuelo puede realizarse mediante el empleo de *funciones de orientación* (figura 3). Una función de orientación se puede entender como un conjunto de funciones polinómicas que representan, cada una de ellas, la variación en el tiempo de uno de los parámetros de orientación externa [Ries et al., 2001].

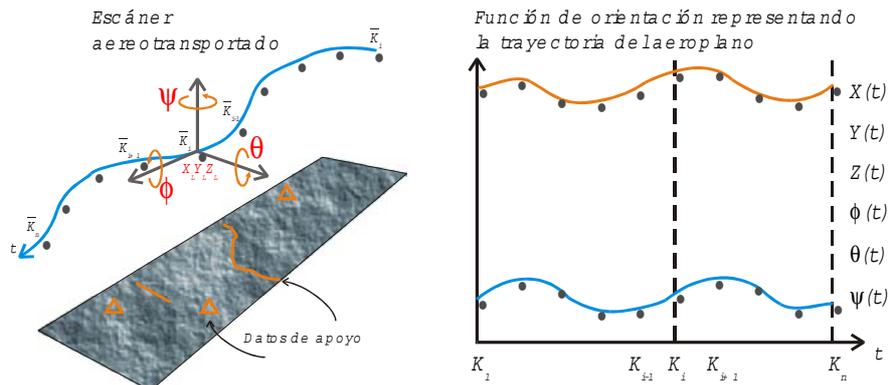


Figura 3: Representación de la trayectoria de un escáner aerotransportado por medio de funciones de orientación

La forma de una curva “S” d -dimensional (en nuestro caso: $d=6$) compuesta por polinomios cúbicos se define por sus “nodos” \bar{K}_i (expresión (2)). Los “ n ” nodos de la curva “S” definen “ $n-1$ ” segmentos o intervalos (figura 4):

$$\bar{K}_i = \begin{pmatrix} k_{i,1} \\ k_{i,2} \\ \vdots \\ k_{i,d} \end{pmatrix} \quad (i=1(1)n) \quad (2)$$

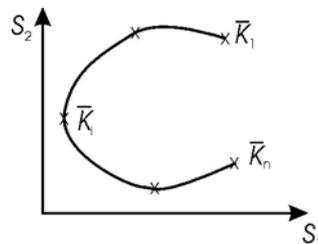


Figura 4: Representación gráfica bidimensional de $n-1$ intervalos correspondientes a dos curvas cualesquiera

Cada uno de estos segmentos está definido por un polinomio cúbico de sexto grado en función de un parámetro “ t ”, resultante de la parametrización de la curva. Los segmentos adyacentes se unen en los nodos, y se impone la condición de que al menos la primera derivada sea continua. Si todos los nodos son conocidos, la función de orientación queda completamente definida [Forkert, 1994].

El tipo de interpolación utilizada en las funciones de orientación suele ser la *interpolación osculatoria*. Este tipo de interpolación se caracteriza porque un nodo erróneo sólo afecta a la forma de la curva en los cuatro intervalos vecinos.

Consecuentemente, la influencia de un nodo sobre la curva resultante es local. La interpolación de un punto de la curva en la posición t del intervalo $[i]$, entre los nodos \bar{K}_i y \bar{K}_{i+1} , sigue la ecuación:

$$s_x(t)_{[i]} = a_{i,x} + b_{i,x} \cdot \tilde{t} + c_{i,x} \cdot \tilde{t}^2 + d_{i,x} \cdot \tilde{t}^3 \quad (3)$$

donde $\tilde{t} = t - t_i$, $(x = 1(1)d)$

3.2. Segunda fase: Remuestreo y producción de ortoimágenes

Los datos necesarios para la producción de una ortoimagen son: imagen en formato digital, parámetros de orientación interna y externa, y un modelo digital, e.g. un modelo digital del terreno (MDT). La georreferenciación de la imagen aérea para la producción de la ortoimagen se lleva a cabo mediante un proceso de remuestreo.

Con la ayuda de la función de orientación cada una de las líneas de la imagen se epipolariza sobre la superficie terrestre. Además, si disponemos de un MDT podemos obtener una imagen georreferenciada u ortoimagen. El proceso de remuestreo puede apreciarse en la figura 5. En primer lugar (figura 5a), se define una malla regular en el sistema terreno que representa los píxeles de la imagen georreferenciada. Dicha malla se utiliza para relacionar el sistema terreno e imagen. Las alturas de la superficie se obtienen evidentemente a partir del MDT. A continuación (figura 5b), se calculan en la imagen original las posiciones de cada punto de la malla aplicando las fórmulas de la proyección central. Para ello, deben de haberse interpolado los parámetros de orientación externa según la función de orientación (expresión (3)). Finalmente (figura 5c), se interpolan los valores radiométricos de los puntos de la malla a partir de los niveles de grises de los píxeles vecinos en la imagen original. La imagen resultante es una ortoimagen o imagen georreferenciada [Kraus, 1994].

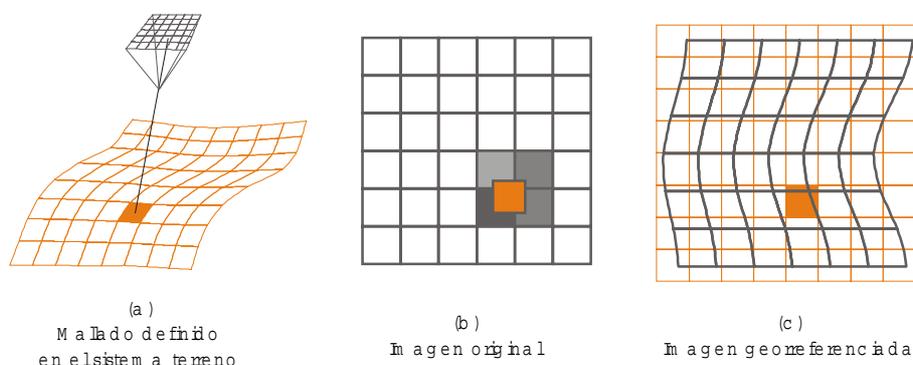


Figura 5: Principio de la georreferenciación de imágenes

4. EJEMPLO PRÁCTICO

Como ejemplo práctico se muestra a continuación el proceso de georreferenciación y ortorrectificación de una pasada perteneciente a un vuelo fotogramétrico realizado en Viena, en el año 2000, a cargo del Austrian Health Institute.

4.1. Instrumentación utilizada y datos de partida

El sensor utilizado para la toma de imágenes fue el escáner de rotación multiespectral DAEDALUS AADS 1268 Airborne Thematic Mapper (ATM). Este escáner registra datos en once canales o bandas espectrales, incluyendo desde la luz visible hasta el infrarrojo lejano. Algunas de las características técnicas del escáner y otros datos de interés se muestran a continuación:

Frecuencia de barrido: 25 Hz

FOV: 42.96°

IFOV: 1.25 mrad

Altura de vuelo sobre el terreno: 2000-2300 m

Número de píxeles por línea: 716 píxeles (Anchura de línea sobre el terreno: 1600-1800 m)

Proyección de un píxel sobre el terreno: 2.5-2.8 m

Número total de líneas en la pasada: 8810

En la figura 6 se puede ver un detalle de la imagen original.



Figura 6: Detalle de la imagen original tomada por el escáner
(Zona Belvedere en el centro de Viena)
Combinación 6/4/2 en R/G/B (infrarrojo)

Se utilizó el sistema GPS/INS CCNS de AEROcontrol (IGI). Los datos obtenidos fueron:

- coordenadas tridimensionales de los centros de proyección (X_L , Y_L , Z_L) con una precisión de 1-3 m, y
- los tres giros correspondientes (ϕ_L : balanceo ("roll"), θ_L : cabeceo ("pitch"), ψ_L : guiñada ("yaw")) con una precisión superior a $1/100^\circ$ para ϕ_L y θ_L , y superior a $1/10^\circ$ para ψ_L .

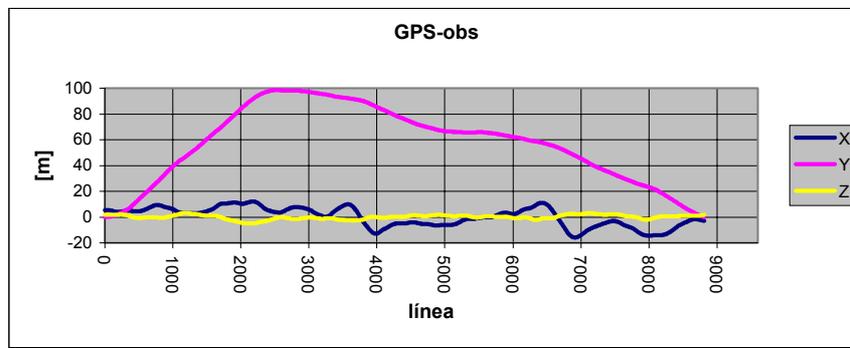


Figura 7: Observaciones GPS a lo largo de la pasada

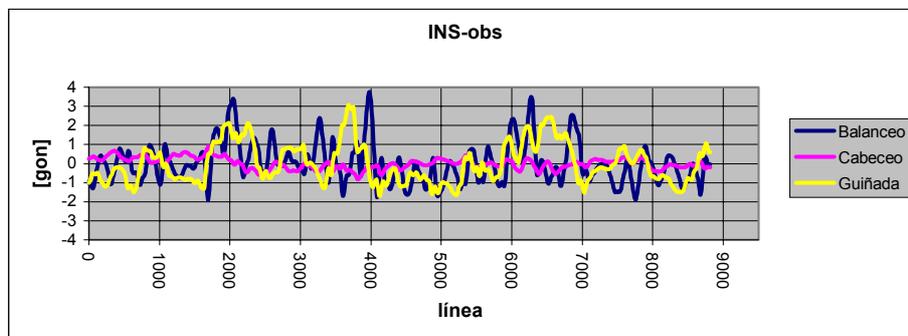


Figura 8: Observaciones INS a lo largo de la pasada

Se utilizó un MDT con una precisión en altimetría de 1-3 m para la extracción de coordenadas altimétricas de puntos de apoyo (mediante interpolación), así como para la posterior generación de las ortoimágenes. Las coordenadas planimétricas de dichos puntos se extrajeron de un mapa en formato ráster de la ciudad de Viena, cuyo tamaño de píxel correspondía a 0.25 m en el terreno.

Los datos del sistema GPS/INS integrado y los puntos de apoyo medidos se utilizaron para calcular los parámetros de orientación externa mediante un ajuste híbrido. Los parámetros de la orientación interna se conocían *a priori*, siendo éstos:

x_0 = parámetro t_i

y_0 = 358 píxeles (mitad de la línea)

c = 955 píxeles

4.2. Ajuste híbrido

Previo paso a la georreferenciación de las imágenes aéreas, i. e. la producción de la ortoimagen, es necesario hacer un ajuste híbrido para el cálculo de los parámetros de orientación externa de cada nodo. El ajuste híbrido se llevó a cabo con el programa ORIENT desarrollado por el Instituto de Fotogrametría y Teledetección de Viena (I.P.F.). Este programa está especialmente diseñado para el ajuste riguroso en el campo de la fotogrametría. En él, los observables del GPS/INS se introducen como “observaciones directas” de los nodos de las funciones de orientación. Así pues, para cada uno de los nodos, los parámetros de orientación externa se introducen en el ajuste como observables y a la vez, como incógnitas. Los observables GPS/INS forman un modelo *quasi* rígido que puede ser “trasladado” y “rotado” mediante los parámetros de descentrado del GPS (“GPS-position-offset”) y del INS (“INS-angle-offset”). Estos parámetros se pueden definir para cada pasada y sus correcciones se calculan en el ajuste [Kager, 1995].

Debido a la gran cantidad de información los nodos se definieron cada 10 líneas, sin pérdida de observaciones significantes.

Otro factor que hay que tener en cuenta es la fuerte correlación existente entre ϕ_L y la posición perpendicular a la dirección de vuelo (en nuestro caso el parámetro X_L), así como entre θ_L y la posición paralela a la dirección de vuelo (parámetro Y_L). Por ello se introdujeron en el ajuste “observaciones ficticias” de los parámetros de descentrado del INS (concretamente en ϕ_L y θ_L) con el fin de evitar singularidades.

Así pues, los observables introducidos en el ajuste híbrido son los siguientes:

- Coordenadas imagen y terreno de puntos de apoyo.
- Coordenadas (X_L, Y_L, Z_L) de los centros de proyección proporcionadas por el GPS.

- Giros (ϕ_L, θ_L, ψ_L) de los centros de proyección proporcionadas por el INS.
- Observaciones ficticias para el descentrado del INS en ϕ_L y θ_L .

y las incógnitas buscadas son:

- Coordenadas terreno de los puntos de apoyo.
- Los seis parámetros de la orientación externa para cada nodo de la función de orientación.
- Los descentrados del GPS en X_L, Y_L y Z_L .
- Los descentrados del INS en ϕ_L, θ_L y ψ_L .

A priori se consideró que la precisión en la coordenada imagen medida resultara ser 1/3 del tamaño del píxel, es decir, $\sigma_0 = \pm 0.33$. El número total de observables introducidos en el ajuste fue de 5.727 (= 87 puntos de apoyo * 5 + 881 nodos * 6 + 6 descentrados) con una redundancia de 174. Tras realizar el ajuste, el e.m.c. resultó ser igual a ± 0.25 . Los e.m.c. *a posteriori* de todos los observables estaban también en el rango de los e.m.c. *a priori*, y los residuos estaban todos ellos dentro de tolerancia.

4.3. Generación de la ortoimagen

La generación de la ortoimagen es un paso posterior al ajuste híbrido puesto que los parámetros de orientación externa deben conocerse (ver apartado 3.2.). En nuestro caso, la generación de la ortoimagen se realizó con el programa DOP desarrollado por el I.P.F. Este programa está diseñado específicamente para la realización de ortoimágenes digitales a partir de imágenes aéreas. En él se introdujeron el MDT y los parámetros de orientación resultantes del ajuste. La ortoimagen se calculó siguiendo el proceso de remuestreo apuntado en el apartado 3.2. Véase a continuación un detalle de la ortoimagen generada:



Figura 9: Detalle de la ortoimagen generada
(Zona Belvedere en el centro de Viena)
Combinación 4/3/2 en R/G/B (color verdadero)

La diferencia entre ambas imágenes (figuras 6 y 9) es significativa no sólo por el aspecto geométrico, sino por cuestiones cualitativas y de reconocimiento multispectral.

5. CONCLUSIÓN

Con la reciente introducción en el mercado de escáneres aerotransportados, la utilización de sistemas integrados GPS/INS es fundamental y redundante en la adquisición de imágenes y en la generación de productos digitales muy competitivos, por ejemplo ortoimágenes. En este artículo se han expuesto las claves de la georreferenciación de imágenes lineales obtenidas con escáneres rotacionales y orientadas a partir de procedimientos mixtos. Los resultados conseguidos muestran que los nuevos sensores y las nuevas tecnologías aerotransportadas existentes son hoy en día operativas para fines cartográficos.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento al Austrian Health Institute, propietario de las imágenes mostradas, y al Instituto de Fotogrametría y Teledetección de Viena por el apoyo proporcionado en todo momento.

7. BIBLIOGRAFÍA

- FORKERT G.: “Die Lösung photogrammetrischer Orientierungs- und Rekonstruktionsaufgaben mittels allgemeiner kurven-förmiger Elemente”. Geowissenschaftliche Mitteilungen. I.P.F., Viena, julio 1994.
- FORKERT G., KAGER H., RIES C.: “Rectification of Airborne Scanner Images Using Spline Functions for Modelling Flight Path and Attitude Parameters”. Proceedings of the Third Joint European Conference & Exhibition on Geographical Information. Viena, Austria, 1997, pp. 106 - 115.
- KAGER H.: “ORIENT, A Universal Photogrammetric Adjustment System, Reference Manual”. I.P.F., Vienna, 1995.
- KRAUS K.: Photogrammetry Volume 1, Fundamentals and Standard Process, 5ª edición. Ferdinand Dümmler. Viena, 1994.
- LERMA J.L.: Fotogrametría Moderna: Analítica y Digital. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, 2002.
- PORTALÉS C.: Georeferencing of GPS/INS – Supported Airborne Multispectral Scanner Data. Proyecto final de carrera en TU-WIEN. Viena, junio 2002.
- RIES Ch.: “Geometrische Rektifizierung von Flugzeugscanneraufnahmen des multispektralen Rotationsscanners DAEDALUS AADS 1268 Airborne Thematic Mapper (ATM)”. No publicado. I.P.F., Viena, 2001.
- RIES Ch., KAGER H., STADLER P.: High-quality geo-referencing of GPS/IMU-supported multi-spectral airborne scanner data – experiences and results. I.P.F., Viena, 2002.
- SKALLOUD J.: “Problems in Direct-Georeferencing by INS/DGPS in the Airborne Environment”. ISPRS Workshop on ‘Direct versus Indirect Methods of Sensor Orientation’ WG III/1. Barcelona 25-26, 1999.