

"CARACTERIZACIÓN DEL SENSOR HIPERESPECTRAL AHS PARA LA GEORREFERENCIACIÓN DIRECTA DE IMÁGENES A PARTIR DE UN SISTEMA INERCIAL GPS/IMU"

J. G. Rejas, E. Prado, M. Jiménez, A. Fernández-Renau, J.A. Gómez y E. De Miguel.

rejasaj@inta.es

Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, INTA
Crta. de Ajalvir km 4 s/n 28850 Torrejón de Ardoz (Madrid)

Palabras clave: hiperespectral, georreferenciación directa (DG), calibración, cartografía digital.

Resumen

El Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA) ha incorporado desde septiembre de 2003 a su plantilla de sensores aeroportados, uno nuevo de tipo hiperespectral llamado AHS (*Airborne Hyperspectral Scanner*), que supone una apuesta en tecnología de última generación para facilitar a la comunidad científica datos adecuados que permitan abordar proyectos en las tendencias que apuntan diversas áreas de investigación.

En el presente trabajo se describe la caracterización geométrica del sensor y las calibraciones realizadas para utilizar los parámetros de orientación externa medidos por un sistema inercial GPS/IMU en la georreferenciación directa de las imágenes que genera. Debido a su especial configuración espectral, y a las ventajas operativas que se obtienen de la integración con la plataforma aérea del INTA, se expondrá así mismo la potencialidad del AHS en cartografía en tiempo real y de rescate, tarea para la que es necesario primeramente resolver el problema de la automatización en la rectificación de las imágenes y la transmisión de datos en vuelo.

1. Introducción

El desarrollo en las últimas décadas de sensores hiperespectrales amplía las posibilidades de utilización de la teledetección en la representación y estudio de las características biofísicas de la Tierra, y de las de otros cuerpos celestes observados. Hacer compatible los medios disponibles con la extensión de los fenómenos a analizar, conduce necesariamente a la optimización de las metodologías empleadas.

Un factor a tener en cuenta en esta mejora de los métodos es el propio instrumento de medida. Para poder emplear cuantitativamente los datos es necesario definir las relaciones espaciales y espectrales del sensor con la superficie observada, es decir, caracterizarlo. En esta fase hay que abordar la calibración del sensor y la integración con otros componentes globales del sistema, como puedan ser los datos de orientación externa medidos por una unidad inercial a emplear en la georreferenciación directa de las imágenes.

Cabe destacar en este sentido, las investigaciones llevadas a cabo por el grupo de trabajo "*Integrated Sensor Orientation*" de la *European Organization for Experimental Photogrammetric Research* (OEEPE), actualmente llamada EuroSDR, formado por colaboración de distintos organismos europeos y empresas fabricantes. En 2001 este grupo presentó los resultados de diversos test como respuesta a la madurez alcanzada por la tecnología inercial en combinación con GPS en orientación directa de sensores ([1][3][11] entre otros).

El interés de los sistemas inerciales en georreferenciación de imágenes es que pueden potencialmente, proporcionar de manera directa los parámetros de orientación exterior (POE) de sensores aeroportados. Para que resulte operativo un sistema de Observación de la Tierra de este tipo, formado por un sensor de imagen y un sistema inercial GPS/IMU, es necesario primeramente integrar (analítica y electrónicamente) y calibrar los distintos subsistemas que intervienen. Una de las tareas más críticas es la determinación del alineamiento de la unidad de medida inercial (IMU) respecto del sensor (calibración de *boresight*), de especial complejidad en escáneres lineales.

El INTA ha incorporado a su plantilla de sensores un escáner denominado AHS que pretende dar respuesta a la demanda por parte de la comunidad científica de datos hiperespectrales, y que gracias a su configuración específica complementa a su vez la de otros sensores hiperespectrales ya operados en la actualidad. En octubre de 2003 se presentó el AHS en el XXI Congreso Nacional de Teledetección de la AET (Asociación Nacional de Teledetección) celebrado en Cáceres, en el que se pudieron mostrar y analizar in-situ las imágenes adquiridas por el sensor un día antes.

En el marco de los trabajos de puesta a punto del sensor, se encuadra la caracterización geométrica y la integración con un sistema inercial de posicionamiento y orientación cuyo objetivo último permita la georreferenciación directa de las imágenes. Este artículo concluye con un apartado en el que se esbozan las expectativas de aplicación del AHS en cartografía en tiempo real.

2. El escáner hiperespectral AHS

El espectrómetro de imagen AHS es un escáner lineal aeroportado tipo *whiskbroom* de 80 bandas en el espectro electromagnético, desarrollado por la casa *Imaging Group ArgonST* [19] bajo los requerimientos especificados por el INTA. Las características técnicas del sensor se definen por sus resoluciones (espacial, radiométrica, espectral y temporal) así como por el tipo de geometría de adquisición, que a continuación se detalla.

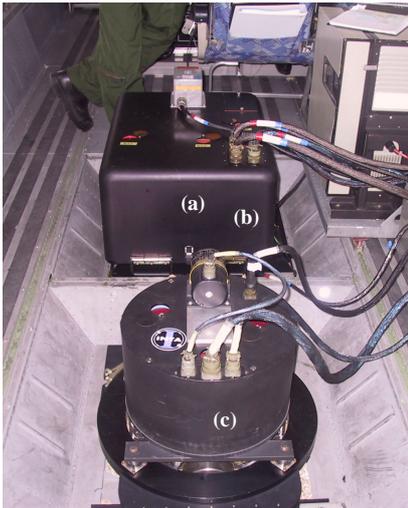


Figura 1. AHS (a), posición IMU (b) y ATM (c).

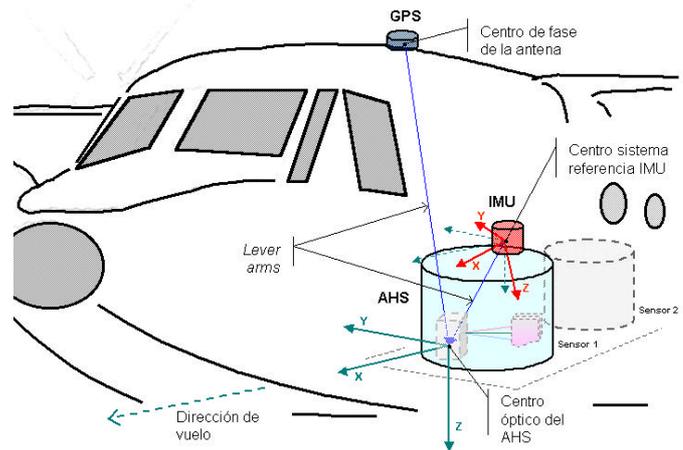


Figura 2. sistema AHS-GPS-IMU.

2.1 Características radiométricas y espectrales

El AHS registra datos en 12 bits dentro de las ventanas atmosféricas del visible al infrarrojo térmico y divide la radiación incidente en 5 espectrómetros o “puertos” individuales. Dispone de dos cuerpos negros como fuentes de referencia, controlables en temperatura en un rango de -15°C a $+25^{\circ}\text{C}$ con respecto a la temperatura de la cabeza sensora.

Canal	Límites Espectrales		Rango Espectral	Ancho Espectral μm	NER Est. @ 25 r.p.s $\text{w.cm}^{-2}.\text{nm}^{-1}.\text{sr}^{-1}$	
	Inferior μm	Superior μm				
1 a 20	0,43	1,030	VIS+NIR	0,030	2,0 E-08	PORT #1
21	1,550	1,750	SWIR	0,20	1,0 E-08	PORT #2A
22 a 65	1,994	2,540	SWIR	0,013	1,5 E-08	PORT #2
66 a 69	3,30	5,40	MIR	0,30	1,50	PORT #3
70 a 80	5,10	12,70	LWIR	0,30	1,00	PORT #4

Tabla 1. Configuración espectral del AHS.

2.2 Geometría de adquisición

La modelización y caracterización de la geometría de adquisición en sensores de Observación de la Tierra, es una tarea fundamental para el uso riguroso y efectivo de estos instrumentos en proyectos de ingeniería y de teledetección en los que se requiera un dato georreferenciado. Para algunos sistemas, como por ejemplo los escáneres lineales de adquisición por barrido de los que es un caso el AHS, la orientación directa se presenta como la única alternativa eficaz y operativa en el tratamiento de los datos.

Previamente a ella, hay que determinar los parámetros que describen la geometría interna del sensor. Para el AHS, el FOV (*Field of View*) y el IFOV (*Instantaneous Field of View*) junto a la velocidad de barrido especifican su orientación interna y la cobertura y resoluciones espaciales a las que puede registrar un dato. La gama de velocidades de barrido del AHS es 6,25; 8,3; 12,5; 16,7; 25; 40 Hz, que para un FOV de 90° y un IFOV de 2.5 mrad permiten obtener resoluciones que van de 2.4 a 13.7 m en alturas típicas de vuelo.

La distancia focal nominal del AHS son 6 pulgadas (15.24 cm). Para estimar la distancia focal efectiva y ajustar el parámetro teórico, se ha empleado la función matemática conocida para sensores *whiskbroom* [7] y la relación de esta con la altura de vuelo y la distancia focal en una cámara matricial, aprovechando la capacidad que tiene el sistema de teledetección aeroportado del INTA para realizar vuelos en tandem con dos sensores [9].

Sensor	AMDC	Daedalus 1268	AHS
Tipo	cámara digital	<i>whiskbroom</i>	<i>whiskbroom</i>
FOV	39°	85.92°	90°
IFOV	0.32 mrad	2.5 mrad	1.25-2.5 mrad
Altitud sobre el terreno (m)	1376	1376	1376
Tamaño imagen (píxel)	2024 x 2041	736 x 1	753 x 1
Cobertura (m)	1000 x 1000	2564 x 3.44	2751 x 3.44
Resolución (m)	0.5	3.44	3.44

Tabla 2. Características geométricas de la AMDC, Daedalus1268 y AHS.

La distancia focal en el AHS se puede expresar en función de su ángulo y arco (s) de barrido como:

$$s/2 = f_{\text{AHS}} * (\text{FOV}_{\text{AHS}} / 2) \quad (1)$$

De la misma manera la cobertura espacial se deduce como:

$$Y_{\text{AHS}} / 2 = (H - h) * \tan(\text{FOV}_{\text{AHS}} / 2) \quad (2)$$

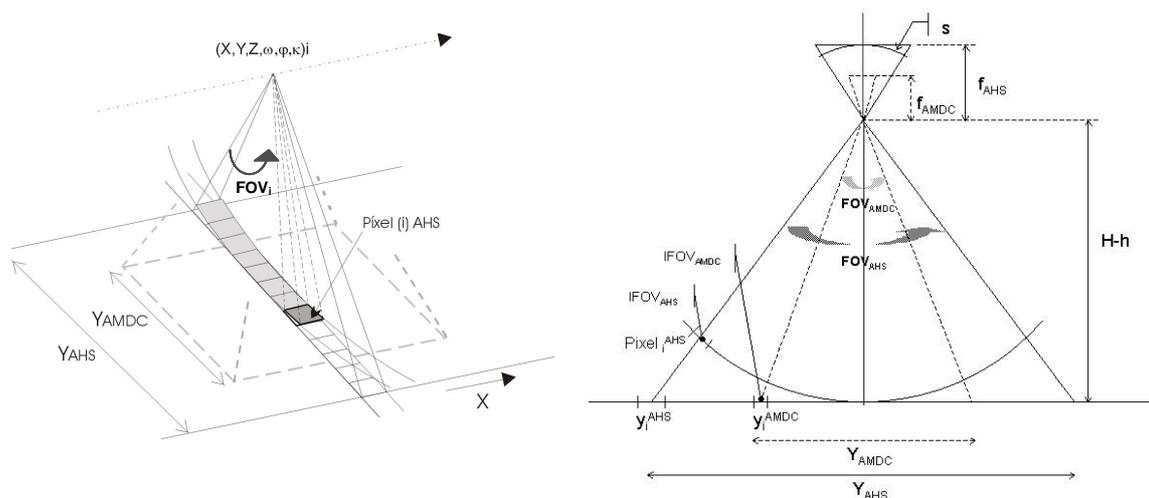


Figura 3. Esquema de vuelo simultáneo AHS y AMDC.

Para una misma altura de vuelo (H-h) se ha establecido la relación entre escalas para el AHS y la cámara digital AMDC, sensor cuyo detector es un CCD matricial de tamaño conocido, y consiguientemente se ha determinado la distancia focal efectiva del AHS que hemos adoptado en su orientación interna.

2.3 Integración con un sistema inercial de posicionamiento y orientación

El sistema inercial que se ha utilizado es un POS/AV 410 de Applanix [14], diseñado específicamente para la georreferenciación directa de datos de sensores aeroportados. Mide ratios de rotaciones y aceleraciones mediante tres giróscopos de fibra óptica y tres acelerómetros de silicio, respectivamente, que permiten obtener una precisión en la medida angular en post-proceso de 0.008° para el alabeo (*roll*) y el cabeceo (*pitch*), y 0.015° para el azimut (*true heading*).

El POS/AV 410 está asistido por un receptor GPS de doble frecuencia (L1/L2) y 12 canales, capaz de operar en modo diferencial, que proporciona datos de posición y velocidad de la trayectoria de vuelo con una precisión de 5-10 cm en post-proceso.

parámetro	AHS
Modelo de sensor	0.1 mrad
Sincronización	0.028 s
Posición (X,Y)	1.2 m
Altitud (Z)	3 m
Roll/pitch	0.15 mrad
Heading	0.6 mrad

Tabla 3. Requerimientos de precisión para el AHS en la configuración de los vuelos de calibración.

La posición precisa medida por el receptor GPS es, mediante un filtro de Kalman, complementada e integrada con las salidas de la IMU, y viceversa, de tal manera que podemos obtener datos de posición y orientación para cada línea de imagen del AHS bajo los requerimientos de precisión y operación de este.

La sincronización del AHS y del POS/AV 410 se realiza a partir del pulso TTL (*Transistor Transistor Logic*) que genera el escáner en la mitad de cada línea para cada velocidad de barrido, según la configuración de vuelo. Este pulso es la señal evento que registra el POS/AV 410 para cada línea de imagen registrada junto con un dato de tiempo GPS, posición y velocidad en autónomo, y que permite relacionarla con su correspondiente dato del sistema inercial.

2. Test empírico

Para determinar el alineamiento de la IMU respecto al AHS, se ha realizado un vuelo a partir del cual se ha podido establecer redundancia estadística adecuada y calcular parámetros de orientación externa independientes a los medidos por el sistema inercial.

El diseño del test es fundamental para la obtención de parámetros contrastables. Se ha tenido presente no sólo la configuración interna del sistema (plataforma-sensor-IMU-GPS), sino la propia relación con los condicionantes habituales en una campaña aeroportada (altura de vuelo, temperatura, velocidad, rumbos, derivas aeronáuticas, estado atmosférico, distancia a estación GPS de referencia, Datum, etc) que influyen en el cálculo y estabilidad de los parámetros de calibración [3][4]. De esta manera se pretende contemplar las distintas fuentes de error que puedan intervenir y las posibles correlaciones entre parámetros internos y externos que puedan producirse.

3.1 Diseño y adquisición de datos del vuelo de calibración

El objetivo que se persigue con este vuelo es poder modelizar la geometría perspectiva de cada línea (modelo del sensor), modelizar el movimiento de la plataforma a lo largo del vuelo (modelo de plataforma), y calcular los parámetros de ambos modelos.

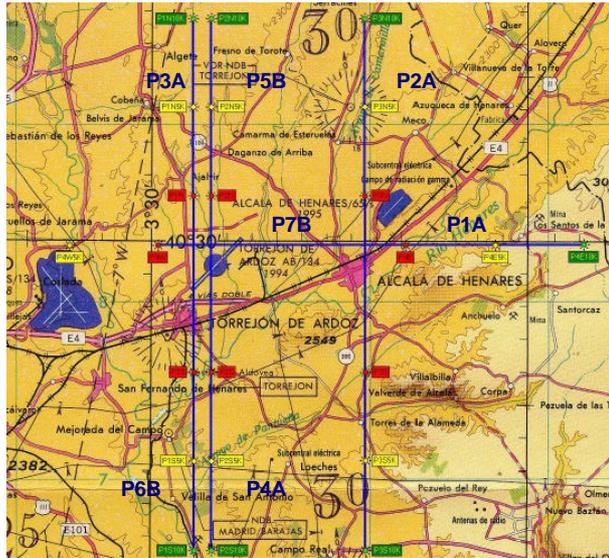
Los datos fueron adquiridos el 26 de abril de 2004, sobre un área entre Torrejón de Ardoz y Alcalá de Henares en un vuelo simultáneo con el sensor AHS en posición más próxima a la cabeza del avión y el sensor ATM del escáner Daedalus 1268 [10] en posición más próxima a cola. La configuración espectral del AHS cubrió de 0.43 a 12.7 μm en sus 80 bandas, mientras que la del ATM ha sido de 0.42 a 13.0 μm en 11 bandas espectrales. Así mismo, se han registrado datos sobre el terreno con espectrorradiómetros GER 1500 y GER 2600 en distintas superficies identificables, medidas a utilizar en calibración radiométrica.

El diseño básico del test empírico se corresponde con ejes de vuelo (nos referiremos a ellos de la misma manera como “pasadas”) formando una cruz, en direcciones Norte-Sur y sentidos contrarios, y Este-Oeste. Se registraron 4 pasadas a 1373 m de altura sobre el terreno y 25 Hz, con una cobertura espacial de 2746 m perpendicular a dirección de vuelo (*cross-track*), 14.0 km en dirección de vuelo (*along-track*) y resolución nominal de 3.44 m. Otras 3 pasadas fueron realizadas a 981 m de altura y 35 Hz, con cobertura espacial de 1982 m (*cross-track*), 10.0 km (*along-track*) y resolución de 2.46 m.

Se han incluido ejes de vuelo a distintas alturas para estimar la correlación entre la focal efectiva del sensor y los parámetros de *boresight*, adaptando la siguiente relación [10] a la configuración del vuelo:

$$H_{\text{Alta}} = 1.5 \times H_{\text{Baja}} \quad (3)$$

de tal manera que se obtiene un solape entre pasadas a distinta altura del 70 % satisfactorio para abordar correlación de imagen en ambas alturas. Uno de los ejes de vuelo se ha hecho coincidir con una zona de acusado relieve (>15%), el cerro Gurugú, para estimar la distorsión de este efecto y la exactitud esperada para este caso.



Pasadas	Altas				Bajas		
Sensores	AHS – ATM (Daedalus 1268)						
Velocidad de barrido	25 Hz (AHS)				35 Hz (AHS)		
Altura	1373 m				981 m		
Resolución	2.46 m				3.44 m		
Longitud	14.0 km				10.0 km		
Ancho	2746 m				1982 m		
Nombre	P1A	P2A	P3A	P4A	P5B	P6B	P7B
Dirección	E-W	N-S	N-S	S-N	S-N	N-S	E-W

Figura 4. Vuelo de calibración en configuración AHS-ATM.

El polígono de calibración se corresponde con la red microgeodésica del INTA, formada por vértices y puntos de apoyo señalizados dispuestos cada 500 m, accesibles e identificables. La precisión media de los vértices es de ± 2 cm. Esta red se densificó a partir de observaciones geodésicas con receptores GPS Leica 300, para posicionar puntos homólogos dispuestos en las zonas de cruce de las imágenes. Como datos auxiliares se ha utilizado además, cartografía 1:500 y un modelo digital del terreno de paso de malla de 1 m y precisión en altura de 0.5 m para la localización de puntos de control y de chequeo.

Los vértices que lo han requerido han sido preseñalizados para mejorar el contraste radiométrico con el terreno y facilitar su identificación precisa en las imágenes. Se han empleado señales diseñadas básicamente, para responder a las dimensiones y disposición adecuadas en relación con la resolución espacial de las imágenes [5][8]. Se pretende así obtener señales puntuales de tipo reflectivo, que representen uno o pocos píxeles radiométricamente puros en la imagen.

3.2 Cálculo de la trayectoria

Se ha empleado el software POSPAC [14] para el cálculo y proceso de los datos registrados por el sistema inercial, y se ha calculado la trayectoria resolviendo un posicionamiento diferencial cinemático en modo bifrecuencia L1/L2.

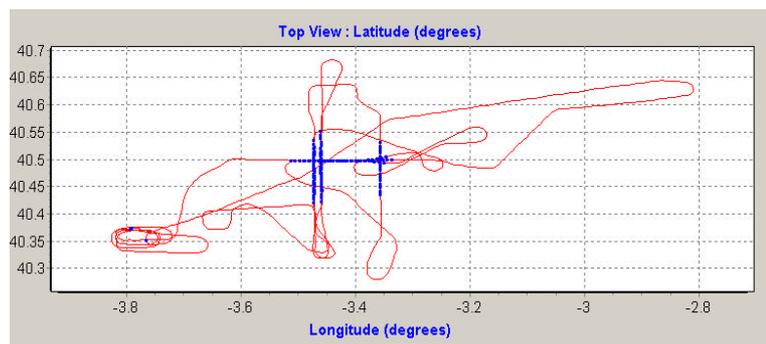


Figura 5. Trayectoria y datos-eventos con correspondencia en imagen (azul).

Para ello se han empleado los datos registrados a 1 sg por un receptor situado en uno de los vértices de la red del INTA, la estación GPS de referencia de la EUITTO [15] y la de la Diputación Foral de Guipúzcoa [26]. Se ha obtenido una desviación estándar en posición entre 0.00 y 0.10 m en el 80.4 % y 73.8 % de las trayectorias calculadas con las dos primeras estaciones de referencia, respectivamente. Para el caso de la estación de referencia situada en Donostia, el 97.3% de la trayectoria se encuentra entre una desviación estándar en posición de 0.30 y 1.00 m, dato que concuerda con otros estudios en los que se manifiesta la influencia esperada de la ionosfera en la resolución de ambigüedades para distancias mayores a 50 km de la estación de referencia [12].

Finalmente se ha calculado una trayectoria con los datos combinados de las estaciones de referencia, con una estimación del error inferior al 0.10 m para el 67.1 % del conjunto del vuelo. Cabe llamar la atención del error obtenido entre 1.00 y 5.00 m para el 1.9 % de la trayectoria, dato fuera de especificaciones, que se ha mantenido en los distintos cálculos efectuados para las tres estaciones de referencia. Este porcentaje se corresponde con el último eje de vuelo realizado, y se observa su repercusión en la calibración de *boresight* obtenida para este caso.

Los datos de la IMU no han presentado ninguna anomalía apreciable, y se han procesado conjuntamente con la posición obtenida para generar así datos de orientación externa para cada línea de imagen, aplicando una transformación de 7 parámetros de WGS84 a UTM ED50 calculada por el IGN (Instituto Geográfico Nacional) [16] y una corrección de alturas elipsoidales al Geoide igualmente facilitadas por este organismo.

3.3 Alineamiento de la IMU respecto del sensor AHS

Previo al trabajo que se presenta, diversos autores han expuesto los resultados obtenidos para el alineamiento de *boresight* en escáneres lineales [7][10][6]. Esta tarea resulta especialmente compleja en este tipo de sensores, ya que su geometría de adquisición menos rígida en comparación con cámaras matriciales y la redundancia estadística necesaria en cada pasada, dificulta el cálculo de parámetros de orientación externa para cada línea de imagen adquirida. Por este motivo, la aplicación de correlación automática de imagen en aerotriangulación permite obtener resultados satisfactorios en estos casos [2].

La calibración de *boresight* consiste en determinar la matriz de orientación del sistema de referencia imagen respecto al sistema de referencia de la IMU, en base a tres ángulos en la misma secuencia de giros de esta. Se han utilizado dos conjuntos de imágenes del global del vuelo, uno para altura de vuelo de 981 m y otro para 1383 m. Se han seleccionado dos ejes de vuelo para cada grupo, este-oeste y norte-sur para las pasadas bajas, y este-oeste y sur-norte para las pasadas altas.

El software empleado ha sido el módulo OrthoEngine [18] dentro del paquete de tratamiento de imágenes Geomática (anteriormente PCI) y el módulo de calibración POSCal, incluido en el programa de proceso de datos inerciales POSPac ya mencionado.

La medida de coordenadas imagen está afectada de errores debidos a dos distorsiones geométricas que no han sido consideradas, ya que las imágenes en esta fase han sido tratadas según se adquirieron en vuelo: distorsión debida a variaciones de velocidad de escaneo y distorsión tangencial por barrido.

La metodología empleada ha consistido en el cálculo de la orientación externa en intervalos de 35 Hz y 25 Hz, respectivamente para ambos grupos, a partir de puntos homólogos y de control dispuestos en el 80 % del ancho (*cross-track*) de las imágenes, considerando como centro el píxel mitad de línea. Se han mantenido como parámetros fijos en el ajuste la posición de los centros perspectivos medidos en el vuelo por el sistema POS/AV 410.

Conjuntamente al control aéreo se han empleado 135 puntos de control terreno (GCP's) para las imágenes a 35 Hz y 126 GPS's para las imágenes a 25 Hz. El error medio cuadrático de los puntos de control en el ajuste de las pasadas bajas ha sido de 4.09 píxeles *cross-track* y 0.56 píxeles *along-track*. En el caso de las pasadas altas, el RMS en el ajuste obtenido ha sido de 3.31 píxeles *cross-track* y 0.54 píxeles *along-track*. El mayor error medio cuadrático obtenido en dirección perpendicular al vuelo es consecuencia principalmente, del efecto de la distorsión panorámica, más apreciable en los extremos de las imágenes.

El alineamiento de *boresight* se ha determinado para el bloque global de imágenes empleadas, si bien se ha obtenido también para las pasadas independientes con el fin de calcular las diferencias con los valores adoptados como verdaderos.

Sensor AHS	Abril de 2004		
	T ω	T ϕ	T κ
Alineamiento de <i>boresight</i> (min. arc.)	4.937	235.553	8.007
Lever arm IMU-AHS (X,Y,Z)	-0.2961 m	0.2309 m	-0.2717 m
Lever arm GPS-AHS (X,Y,Z)	-0.1998 m	-0.0056 m	-2.253 m

Tabla 4. Parámetros de calibración del AHS.

3.4 Análisis de resultados

Las diferencias de posición obtenidas responden a la precisión de la transformación de coordenadas aplicada. Se observa cómo la mayor desviación estándar se obtiene en la última pasada del vuelo (P7B), hecho que concuerda con la peor solución calculada de la trayectoria inicial.

Los residuos de la IMU han cumplido las especificaciones de Applanix para el sistema POS/AV 410, por lo que la precisión de la unidad de medida inercial no resulta significativa para la orientación del AHS. En este sentido no se ha apreciado ninguna anomalía respecto de lo esperado para el sistema.

La orientación del AHS viene determinada en gran medida por la matriz de alineamiento obtenida en la calibración de boresight. Se ha obtenido una elevada desviación estándar en este cálculo, máxima de 5.7 minutos de arco para φ . Este resultado es debido principalmente a dos factores. Por un lado, se ha producido una falta de sincronización del sistema POSAV 410 con el AHS estimada en ± 0.24 sg. Por otro, la no consideración de distorsiones geométricas internas del sensor ha provocado un déficit en la medida de las coordenadas imagen. Estos errores han sido transmitidos desde la determinación de la orientación externa para cada línea de imagen hasta la georreferenciación directa de las mismas.

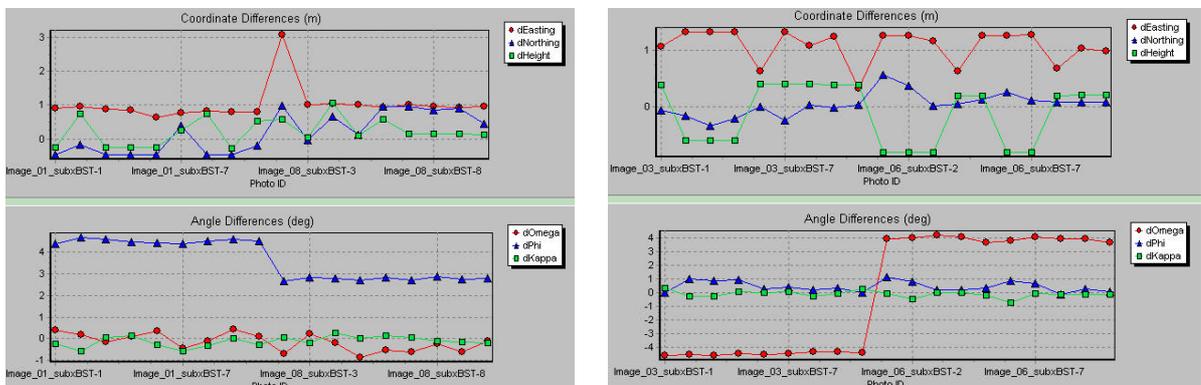


Figura 6. Diferencias en posición y actitud para las pasadas altas (izquierda) y bajas (derecha).

Pasada	P1A (Alta E-W)					
	ΔX (m)	ΔY (m)	ΔZ (m)	$\delta\omega$ (°)	$\delta\varphi$ (°)	$\delta\kappa$ (°)
Diferencias Medias	0.819	-0.306	0.104	0.10054	4.51229	-0.22413
Desviación estándar	0.091	0.276	0.430	0.28011	0.09335	0.24215
Pasada	P3A (Alta N-S)					
	ΔX (m)	ΔY (m)	ΔZ (m)	$\delta\omega$ (°)	$\delta\varphi$ (°)	$\delta\kappa$ (°)
Diferencias Medias	1.073	-0.112	0.057	-4.48777	0.42797	-0.04367
Desviación estándar	0.342	0.125	0.473	0.09095	0.36549	0.20217
Pasada	P6B (Baja S-N)					
	ΔX (m)	ΔY (m)	ΔZ (m)	$\delta\omega$ (°)	$\delta\varphi$ (°)	$\delta\kappa$ (°)
Diferencias Medias	1.083	0.170	-0.309	3.88849	0.42091	-0.21402
Desviación estándar	0.238	0.167	0.507	0.16535	0.38972	0.21493
Pasada	P7B (Baja E-W)					
	ΔX (m)	ΔY (m)	ΔZ (m)	δ (°)	$\delta\varphi$ (°)	$\delta\kappa$ (°)
Diferencias Medias	1.209	0.649	0.328	-0.40151	2.78257	-0.00995
Desviación estándar	0.663	0.365	0.328	0.32686	0.06160	0.15836

Tabla 5. Diferencias para las pasadas que han intervenido en la calibración.

Un resultado significativo ha sido el grado de magnitud del alineamiento (3.9°) obtenido para el ángulo φ , cuya correlación con las direcciones de vuelo es manifiesta, así como la de ω .

Los resultados obtenidos en κ son consistentes con el montaje rígido de la IMU (Figura 1) en el interior de la carcasa del AHS, lo que hace considerar a esta como una instalación adecuada.

4. Georreferenciación directa de imágenes AHS

Se ha utilizado el software de corrección paramétrica de imágenes Parge de ReSe Applications Schlöpfer [17] en la georreferenciación directa. Se trata de un programa específico para barredores lineales que incorpora distintos

modelos internos de geometría de adquisición. Requiere la posición y actitud para cada línea de imagen, modelizar el sensor mediante el FOV, IFOV y configuración de adquisición y un modelo de elevaciones.

Se han calculado los parámetros de orientación externa cada 0.04 sg en las pasadas altas y 0.28 sg en las pasadas bajas, calibrados de *bore sight* y ajustadas las posiciones de la IMU y de la antena GPS respecto al centro perspectivo del AHS, y se han aplicado ya sin la intervención de ninguna fuente de control.

El modelo digital del terreno utilizado ha sido de paso de malla de 2.44 m y precisión en altura de 0.5 m.

El análisis de la exactitud alcanzada en la ortorectificación de las imágenes se está abordando en estos momentos, si bien los defectos en la sincronización principalmente, no hacen presumir que esta se encuentre por debajo de 1 pixel de desviación absoluta. Se ha detectado la causa de este desfase, relacionado con la generación electrónica de eventos y la configuración de barrido del AHS, y se ha corregido su influencia en posteriores proyectos de vuelo al que se presenta.



Figura 7. Imágenes AHS ortorectificadas sin GCP's. P1A (superior) y detalles (inferior).

5. Aplicaciones hiperespectrales

El AHS como sensor hiperespectral está diseñado para abordar proyectos habituales de teledetección. Su configuración espectral, junto con las resoluciones espaciales que permite obtenerse de su integración en la plataforma aérea del INTA, lo hacen especialmente aplicable en geología, hidrografía, edafología, agricultura de precisión, bosques, caracterización de superficies urbanas, etc, en general en aplicaciones medioambientales en las que se requiera un análisis hiperespectral de datos precisos.

5.1 Cartografía en tiempo real

En este apartado se esboza escuetamente el desarrollo de la empresa *Imaging Group ArgonST* [19] para poner operativo un sistema de cartografía en tiempo real a partir de datos hiperespectrales, de especial interés en situaciones de riesgo o catastros medioambientales.

El concepto de cartografía en tiempo real (*real time mapping*) consiste en permitir la transmisión vía radio o satélite de la información temática extraída de imágenes hiperespectrales en cortos períodos de tiempo después de su adquisición.

La primera cuestión que hay que resolver es el problema de la reducción de la dimensionalidad. Los sensores hiperespectrales incrementan potencialmente la información necesaria para establecer con mayor precisión la separabilidad de materiales presentes en o bajo superficie. Pero esta mayor potencialidad de la dimensión de los datos tiene que estar acorde con un mayor número de parámetros que caractericen los materiales, lo que se conoce como Efecto Hughes, y esto muchas veces no va aparejado. Para superar esta dificultad, las investigaciones se han centrado principalmente en tres vías [13]: mejorar la extracción o selección de rasgos para así reducir la dimensionalidad de los datos, regularización de la matriz de covarianza de las muestras y estructuración de una matriz de covarianzas verdadera descrita por un número pequeño de parámetros.

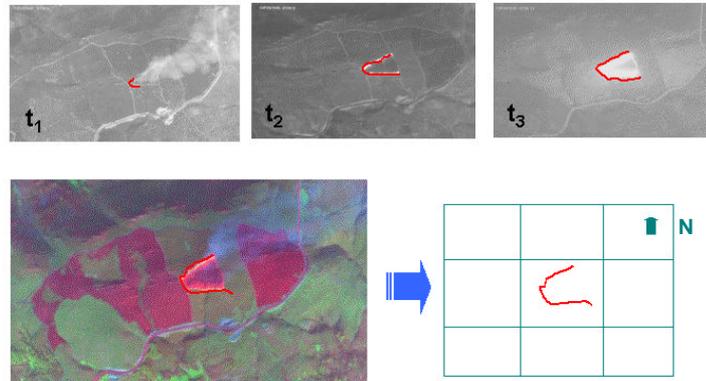


Figura 8. Concepto de cartografía en tiempo real.

Otra cuestión que tienen que estar resuelta desde el momento mismo de la adquisición de los datos es la georreferenciación directa, no de las imágenes, sino de la información extraída, habitualmente en formato vectorial para disponer un volumen adecuado de información a ser transmitido. La precisión en la georreferenciación podrá mejorarse en post-proceso, si bien esta cuestión no será crítica en las situaciones para las que esta técnica es de especial aplicación.

6. Conclusiones

La calibración de la IMU respecto del sistema de referencia espacial del AHS resulta crítica en la orientación directa a partir de datos de un sistema inercial GPS/IMU. La georreferenciación directa de imágenes que se deduce de este tipo de orientación es muy dependiente de la calibración, resultando precisa en un nivel suficiente para la mayoría de las aplicaciones de teledetección aeroportada, si bien es necesario controlar y minimizar todas las fuentes de error. En este sentido, se ha podido comprobar cómo la caracterización interna del sensor, con especial peso la sincronización con el sistema inercial, resulta crítica para poder alcanzar niveles de precisión adecuados.

La condición necesaria de automatizar los procesos de adquisición y análisis de datos en aplicaciones de prospección a partir de imágenes, requiere inevitablemente de una orientación directa a partir de parámetros externos que permitan detectar y proyectar el elemento de interés o “tema” en mapas. La orientación directa unida a la potencia de los datos hiperespectrales, hacen del escáner AHS un instrumento idóneo para el análisis de problemáticas medioambientales.

Agradecimientos

Agradecemos sinceramente a la Escuela de Ingeniería Técnica Topográfica (EUITT) de la UPM y a la Diputación Foral de Guipúzcoa por la utilización de los datos de sus estaciones de referencia GPS.

Igualmente agradecemos al Instituto Geográfico Nacional, por los parámetros de transformación de Datum que nos han sido facilitados.

Referencias

- [1]. Colomina I., 2001. “*Modern sensor orientation technologies and procedures*” Proceedings of the OEEPE Workshop “Integrated Sensor Orientation”.
- [2]. Cramer, M., 2003. “*Integrated GPS/inertial and digital aerial triangulation – recent test results*”. D. Fritsch, ed., ‘Photogrammetric Week ’03, Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, pp. 161–172, 2003.

- [3]. Heipke, C., Jacobsen, K., Wegmann, H., 2001 "*The OEEPE Test on Integrated Sensor Orientation - Results of Phase I*" Fritsch/Sp (Eds.). Photogrammetric Week. Wichmann Verlag, pp: 195-204.
- [4]. Jacobsen Karsten., 2002 "*Calibration aspects in direct georeferencing of frame imagery*" Integrated Remote Sensing at the Global, Regional and Local Scale, ISPRS Commission I, 10-15 November 2002, Denver, CO USA.
- [5]. Kraus, Karl., 1997. "*Photogrammetry. Volume 1. Fundamentals and Standar Procesess*". Edit. Dummler/Bonn, 6th Edition.
- [6]. Alamús, R., Baron, A. and Talaya, J., 2001. "*Integrated sensor orientation at ICC, mathematical models and experiences*". Proceedins of OEEPE workshop "Integrated sensor orientation", OEEPE Official publication No. 43(OEEPE, 2002), pp. 153-162.
- [7]. Müller R., Lehner M., Müller R., Reinartz P., Schroeder M., and Vollmer B. "*A program for direct georeferencing of airborne and spaceborne line scanner images*" Integrated Remote Sensing at the Global, Regional and Local Scale, ISPRS Commission I, 10-15 November 2002, Denver, CO USA. 2002
- [8]. Pagnutti M., Holekamp K., Ryan R, Blonski S., Sellers R, Davis B. and Zanoni V., 2002. "*Measurement sets and sites commonly used for characterization*" Integrated Remote Sensing at the Global, Regional and Local Scale, ISPRS Commission I, 10-15 November 2002, Denver, CO USA.
- [9]. Rejas, J. G., Gutiérrez de la Cámara, O., Callejo P. y Gómez, J. A., 2003. "*Experiencias en la integración de los sensores multiespectrales aeroportados AMDC y Daedalus 1268 con un sistema GPS/INS.*" Sesiones Técnicas, 5ª Semana de Geomática. Barcelona.
- [10]. Saks T., Tempelmann U., Hinsken L., Recke U. 2003. "*ADS40 Calibration & Verification Process*" International Workshop ISPRS, Theory, Technology And Realities Of Inertial / GPS Sensor Orientation. Barcelona.
- [11]. Schmitz, M., Wübbena, G., Bagge, A., Kruck, E., 2001. "*Benefit of Rigorous Modeling of GPS in Combined AT/GPS/IMU-Bundle Block Adjustment*", Proceedings of the OEEPE Workshop "Integrated Sensor Orientation".
- [12]. Talaya Julià, 2000. "*Robust GPS kinematic positioning for direct georeferencing*". ISPRS, vol. XXXIII, Amsterdam, 2000.
- [13]. Landgrebe D., 1999. "*Information extraction principles and methods for multispectral and hyperspectral image data*". Capítulo 1, "Information processing for remote sensing", Ed. C.H.Chen, publicado por World Scientific Publishing Co., Inc., 1060 Main Street, River Edge, NJ 07661, USA 1999.
- [14]. http://www.applanix.com/html/products/prod_av_tech.html
- [15]. <http://gps.euitto.upm.es/>
- [16]. <http://www.cnig.es/>
- [17]. http://www.rese.ch/parge/parge_meth.html
- [18]. http://www.pcigeomatics.com/support_center/tech_papers/OrthoEngine.pdf
- [19]. <http://www.argonst.com/>
- [20]. http://b5m.gipuzkoa.net/GPS/cons_gps.htm