

Cámaras fotogramétricas aéreas digitales: ventajas e inconvenientes. Influencias en la ejecución de cartografía catastral

Luis Julián Santos Pérez

Ingeniero Técnico en Topografía
Ingeniero en Geodesia y Cartografía
Dirección General del Catastro

Resumen

Las cámaras fotográficas digitales han entrado con fuerza en los últimos años en todas las áreas donde fuera necesario el registro de imágenes (desde los hogares a la astronomía pasando por la fotogrametría). En este artículo se describen las características fundamentales de los sensores digitales comparándolos con los analógicos, destacando sus ventajas. Asimismo, se abordan los dos tipos de cámaras, de línea y matriciales detallando sus componentes principales y realizando un estudio comparativo, para terminar haciendo un repaso a las aplicaciones de los sensores digitales y describiendo su posible utilización en el catastro urbano.

Sin duda alguna vivimos en la sociedad de la información, contar con cuanta más información se disponga asegura buenos resultados en la gestión de cualquier empresa, ya sea comercial, industrial, etc ... y por tanto se cumple la máxima de que información es poder.

En múltiples campos es necesario saber dónde se producen determinados fenóme-

nos, se necesita ubicarlos geográficamente, por tanto es fundamental contar con información geográfica georreferenciada. Esta se utiliza abundantemente en la ordenación del territorio para planificación territorial y urbanística, ingeniería civil, agronómica, forestal. También en servicios para la gestión de recursos (telefonía, electricidad, gas).

La fotografía aérea digital es de directa aplicación sobre todo en la cartografía topográfica y ortofotos, pero también, a veces de forma indirecta en la cartografía de consumo, como puede ser en *internet map servers* que suministran mapas en Internet, callejeros, rutas, parques naturales, así como en la elaboración de mapas para navegadores, atlas multimedia, telecomunicaciones y modelos de ciudades en 3d.

Las cámaras aéreas digitales, ofrecen las mismas ventajas que las digitales domésticas que todos tenemos. Quizá el hecho diferenciador es la no necesidad de tener que manejar un siempre incómodo rollo de película y por tanto no tener que pasar por el laboratorio con la consiguiente espera para poder ver las fotos. Por el contrario hay que contar

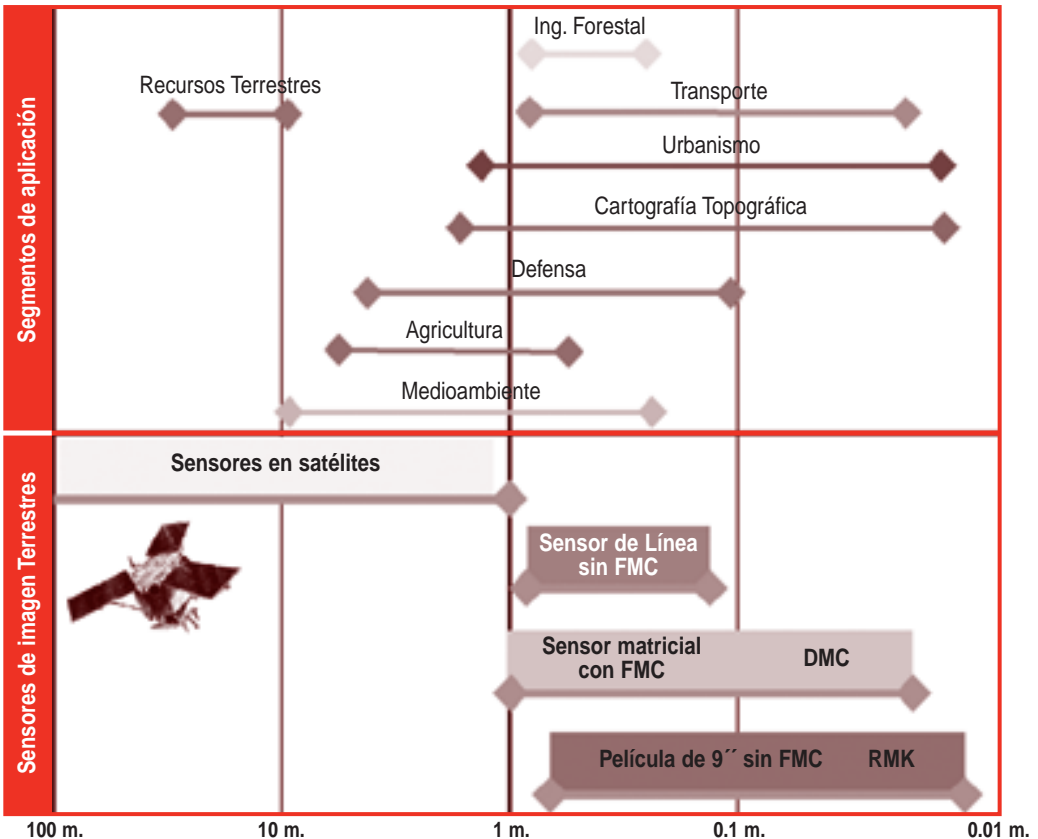
con un ordenador o con una impresora adecuada para ver los resultados en papel lo que hace que no sean muy útiles para el público “no tecnológico”.

En el ámbito cartográfico, del mismo modo, elimina el paso necesario hasta ahora que era la transformación del formato analógico al digital (escaneo de negativos) para poder utilizar los modernos aparatos digitales de restitución. Este proceso ralentizaba el sistema de trabajo y era una fuente de pérdida de precisión. Por tanto ahora el proceso fotogramétrico es mucho más ágil, ya que los

soportes con toda la información salen del avión y entran sin paso intermedio en los sistemas de obtención de cartografía, cuando no se envían por medios telemáticos desde la aeronave a las oficinas técnicas para obtener rápidamente el producto cartográfico.

Podemos hablar no ya de cámaras exclusivamente sino de sensores en general, ya que dentro de ese gran grupo de instrumentos entran tanto las cámaras digitales, como los sensores lidar, radar, magnetómetros y cualquier otro que capte datos de la tierra desde un medio aéreo o espacial.

Figura 1
Resumen del estado actual de los nuevos sensores



Nota: (FMC.- (Forward Motion Correction) Sistema incorporado en las cámaras para eliminar el desplazamiento de la imagen producido por el movimiento longitudinal del avión). (DMC.- Digital Metrical Camera- Cámara Métrica Digital).

En la figura 1 se muestra un resumen del actual estado de estos sensores. En el eje de las x aparece la resolución en metros que permiten alcanzar cada uno de los sensores o la necesaria para los diferentes segmentos de aplicación de la parte superior. Por ejemplo para aplicaciones de cartografía topográfica, como puede ser la catastral, los actuales sistemas nos ofrecen resoluciones que van desde los 2 m. (vuelo alto) a los 5 cm. (sensor lÍdar). Para estudiar recursos terrestres (teledetección) los sensores satelitarios ofrecen resoluciones que se mueven entre los 50 m. y los 10 m.

Si estudiamos la segunda fila de la figura, podemos obtener las precisiones de los actuales sensores, de forma que los ubicados en satélites normalmente utilizados para teledetección van desde los 100 m. (meteorológicos (meteosat) o para usos de suelo (landsat)). Los sensores de línea ó matriciales (cámaras digitales aéreas) van desde 1 m. a los 5 cm. De forma muy parecida a las antiguas cámaras analógicas aéreas de 9“.

Definiciones y estado el arte

Definición de cámara digital.- Cámara fotográfica o de vídeo de estado sólido que suministran señales de salida digital. Es una cámara óptico-electrónica que convierte en su interior la señal analógica a digital. (J.L.Lerma 2000)

Las cámaras analógicas y digitales son muy diferentes entre sí, pero tienen cuatro

componentes básicos que las caracterizan y son la óptica, el sensor, el procesador y el soporte de salida. Las diferencias fundamentales están en el sensor y el procesador como vemos en el cuadro 1.

Las cámaras aéreas digitales, han reemplazado ya a las cámaras aéreas de película tradicional debido fundamentalmente a las mejoras en calidad geométrica y radiométrica así como por la posibilidad de apreciar detalles (resolver) en zonas de sombras oscuras, para registrar simultáneamente pancromático, verdadero color y falso color infrarrojo o para incrementar el recubrimiento sin costes extras de película pero sobre todo por el ahorro del proceso de escaneo. Los hechos presentes hacen que la comunidad técnica esté convencida de que con tales cámaras se puede considerar una nueva estrategia como fuente de adquisición de imágenes.

A modo de curiosidad, para apreciar la rapidez con la que se ha impuesto esta nueva tecnología, se incluye a continuación un texto extraído de otro trabajo del autor de hace sólo 5 años: “...hay que destacar que hoy en día las cámaras digitales no poseen el refinamiento y la robustez necesarias para poder tener un rendimiento similar al de las cámaras métricas analógicas montadas en una aeronave. Los principales obstáculos son la velocidad de desplazamiento (la velocidad de “impresión” de la imagen no es aún lo suficientemente rápida para la velocidad de un avión) y las vibraciones que son de gran magnitud...” (L.J. Santos 2000).

Cuadro 1

Componentes	Cámaras analógicas	Cámaras digitales
Óptica	Lentes y/o espejos	Lentes y/o espejos
Sensor	Emulsión fotográfica	Detectores de estado sólido (CCD, CMOS)
Procesador	Químico (revelado, fijado, lavado secado)	Ordenador (Cálculo matemático)
Soporte	Película	Disco óptico y/o magnético

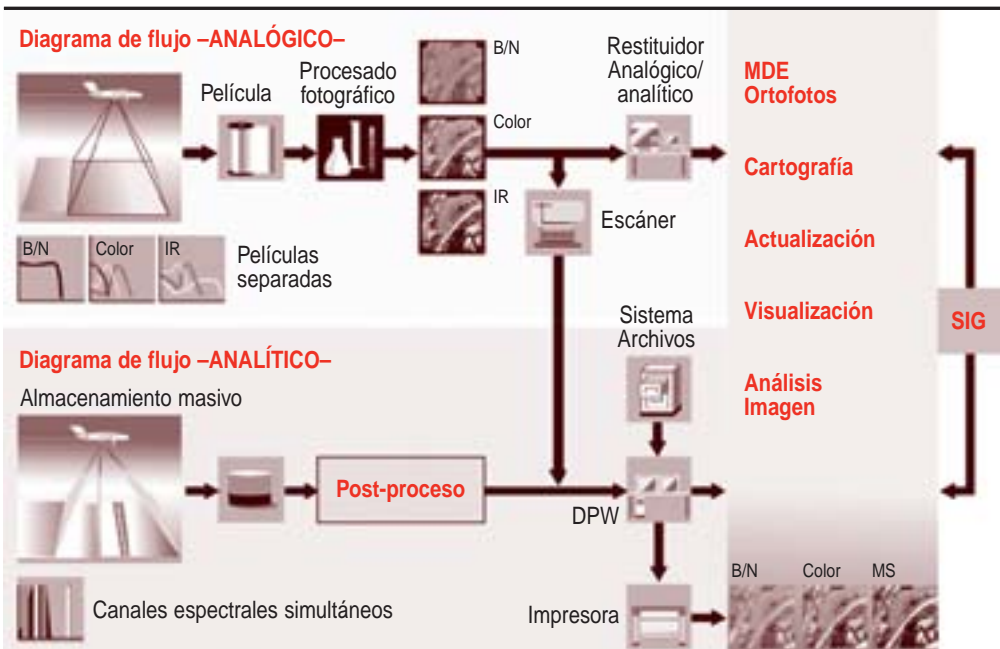
La fotogrametría aérea ha usado desde siempre el 60% de recubrimiento longitudinal y el 20% de transversal (parte común entre dos pasadas o dos fotos consecutivas con el fin de obtener relieve) para la restitución (obtención de cartografía), producción de Modelos Digitales del Terreno y de ortofotos. Las cámaras digitales se pueden usar para superar esas convenciones estándar de forma que el grano de la película nunca más sea un problema, debido a la alta resolución radiométrica situada en 12 bits y nunca volverá a ser un problema que el número de imágenes sea el principal parámetro de un proyecto. Por tanto, el aumentar la redundancia y los recubrimientos aumenta el nivel de precisión.

Estos conceptos se pueden aclarar en la figura 2, muestra que los dos flujos de trabajo esquemáticamente, el sistema analógico arriba y el nuevo sistema digital abajo.

En el sistema analógico el avión sobrevuela la zona de Trabajo y toma imágenes, normalmente en B/N ó color, pero si necesita diferentes productos, sólo podía realizar diferentes pasadas o diferentes cámaras en cada pasada (Blanco y Negro, Color ó Infrarrojo). Una vez impresionada la/s película/s era necesario procesarlas en laboratorio (revelado) y posteriormente utilizar un restituidor analógico ó analítico si no se necesitaba pasar a restituidor digital. Si fuera así, era necesario escanear las imágenes (proceso complejo, laborioso y caro).

En el sistema digital, sólo es necesario volar una vez sobre la zona, ya que las imágenes se registran en los sensores de forma simultánea (Blanco y Negro, Color ó Infrarrojo). Se almacenan en forma digital en enormes Discos Duros y tras un breve post-proceso se puede trabajar con ellas en una DPW (Digital Photogrammetric Worksta-

Figura 2
Sistema analógico y sistema digital



tion) de forma directa e imprimirlas si fuera necesario.

En este punto, las imágenes se pueden emplear para alimentar un SIG, realizar ortofotos (tradicionales ó true-ortho si contamos con datos LIDAR), realizar clasificaciones, etc...

En cuanto a la orientación exterior –que es el sistema de georreferenciación del vuelo–, en el caso de las cámaras digitales es continua, ya sea de barrido de línea o matricial, ya que los sistemas GPS/INS suministran coordenadas muy abundantes de la trayectoria (figura 3). El sistema GPS aporta coordenadas de ciertos puntos y el sistema IMU ofrece las coordenadas de los puntos interpoladas entre dos ofrecidas por el sistema GPS. Por el contrario en la figura 4 se aprecia que la cantidad de coordenadas es mucho menor y se refieren sólo a los puntos de toma de cada fotografía.

Figura 3
Cámara digital aérea

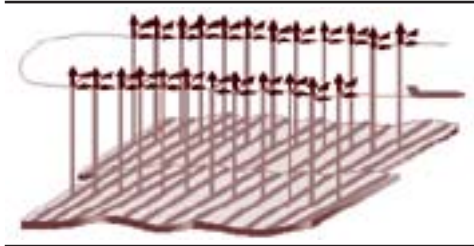
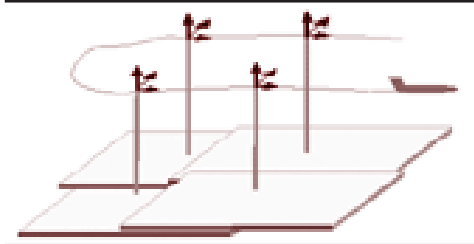


Figura 4
Cámara aérea analógica



Análisis de ventajas e inconvenientes de la cámara digital frente a la analógica

Ventajas de las cámaras digitales

Calidad

1. Al tener mayor rango dinámico ofrece una elevada resolución radiométrica. Esto quiere decir que tiene una gran facilidad para captar los diferentes matices de color de la realidad, mayor cantidad de niveles de gris o de colores diferentes. Una de las consecuencias de este ítem es la gran cantidad de información que se puede diferenciar en las zonas de sombras.
2. El sensor tiene una gran precisión geométrica y permite el control de calidad de las imágenes en vuelo.
3. Mejora la relación señal/ruido.
4. La geometría de la imagen digital es muy estable, no se deforma por ningún factor externo, por tanto tiene una gran precisión espacial.
5. Al no existir procesos químicos de revelado, reproduce muy fielmente el color, no se degrada la calidad por el escaneo al no introducir esos ruidos por no existir ese proceso.
6. Registran información espectral dentro y fuera del rango visible, por tanto capturan información multispectral.
7. Se puede considerar una desventaja frente a la película la resolución geométrica, ya que ésta es un medio de almacenamiento masivo que da resoluciones > 100 líneas/mm. Lo que equivale a 5 – 7 micras (es decir distingue en imagen objetos de ese tamaño, a escala 1:5.000 de vuelo resolvería objetos de 25 mm. sobre el terreno).

Precisión

1. Tamaños de píxel terreno pequeños (desde 5 cm), con precisión menores que 0.1 píxel.

2. Compensación FMC electrónica sin limitaciones mecánicas. Como vimos este dispositivo permite eliminar movimiento en las tomas, antes era mecánico, ahora electrónico.
3. Mejor aptitud para procesos de correlación automática: 2.5 veces mejor que fotograma escaneado. La correlación es el sistema que permite identificar puntos homólogos y por tanto cuando esté perfeccionado restituir ciertos elementos sin intervención humana.
4. Mejor visión en tres dimensiones en sistemas estereoscópicos.
5. Conexión directa al receptor GPS mediante sistema de navegación "Trackair" junto con sistema inercial "Aplnix" que suministran X,Y,Z del punto de disparo así como los 3 giros para la orientación (κ , ψ y ω).

Versatilidad

1. Posibilidad de obtener múltiples productos en un mismo vuelo:
 - Pancromático.
 - Color natural (RGB).
 - Color Infrarrojo (CIR).
 - Cuatro bandas multispectrales.
2. En todas las bandas se ofrecen 12-bit de radiometría. Mientras que las cámaras analógicas ofrecen 6 bits en B/N.
3. Todas las bandas cuentan con alta resolución espacial

Ahorro de tiempo

1. Al no necesitar procesos de revelado, fijado, secado y copiado, el tiempo de proceso es muy pequeño y el flujo de trabajo puede ser continuo.
2. Rápida adquisición de imágenes de gran formato y visionado "on-line".
3. Control de calidad en tiempo casi-real en vuelo.

4. Agiliza los procesos de correlación automáticos.
5. Las imágenes están disponibles en minutos
6. No hay que digitalizar (escanear) las fotografías. Ahorro enorme de tiempo y eliminación de fuentes de errores.

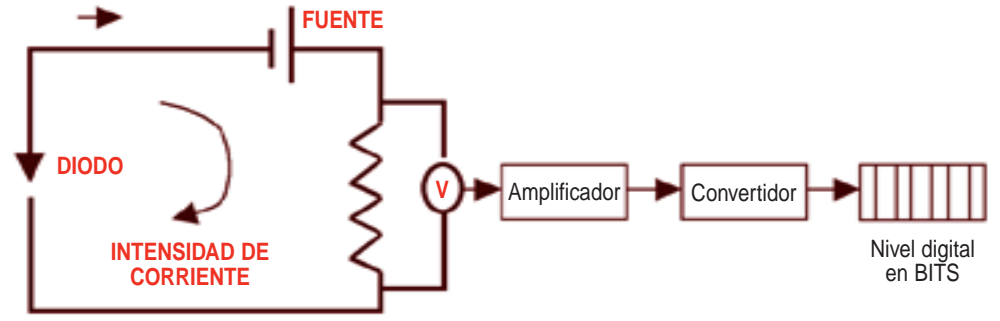
Costes

1. Desaparecen los costes del material fotográfico (película+revelado)
2. Eliminación de gastos por escaneo (paso de formato analógico a digital, ahora todo es digital)
3. Por el contrario los costes del sistema de adquisición de datos (cámara+software+periféricos) son mucho más altos, ya que aumenta el número de horas/día de vuelo.

Ventajas de las cámaras analógicas

1. Su precio hoy por hoy es inferior al de las cámaras digitales.
2. Son bastante más robustas, tienen pocos componentes y son menos sensibles.
3. Poseen una elevada resolución geométrica (40-60 líneas/mm.). Hoy en día aún no la han igualado las cámaras digitales. Tienen una geometría estándar y perfectamente conocida.
4. Tienen un alto rango de escalas y cubren más superficie para la misma escala ya que tienen un FOV (Field Of View) alto, es decir gran ancho de banda.
5. Sus chasis (receptáculo para la película) son intercambiables y por tanto se pueden llevar en el avión films de diferentes sensibilidades.
6. Los costes de almacenamiento de los materiales sensibles son muy bajos y el sistema de almacenamiento más duradero que el digital.
7. Las películas tienen una larga durabilidad.

Figura 5
Esquema electrónico de una cámara digital



8. Es posible volar mucho más bajo que con una cámara digital debido a que con estas últimas se necesita un tiempo para cada exposición que no lo permite por la velocidad a la que “pasa” el terreno.

Características de las cámaras digitales aéreas

Las cámaras digitales se diferencian de las analógicas en que las primeras no necesitan revelado fotográfico para hacer visible la imagen latente, sino que ésta se forma al incidir la luz reflejada por el objeto en sensores fotoeléctricos formando así la imagen impresionada (1)

El diodo es un dispositivo que deja pasar corriente eléctrica en una dirección y no en la contraria, de forma que si se ilumina dejará pasar corriente en ese sentido. Son, por tanto, rectificadores de corriente, pasan de corriente alterna a continua. Se llamará fotodiodo si es sensible al paso de una señal luminosa. El circuito llevará un amplificador de señal y un convertidor para pasarla de analógica a digital.

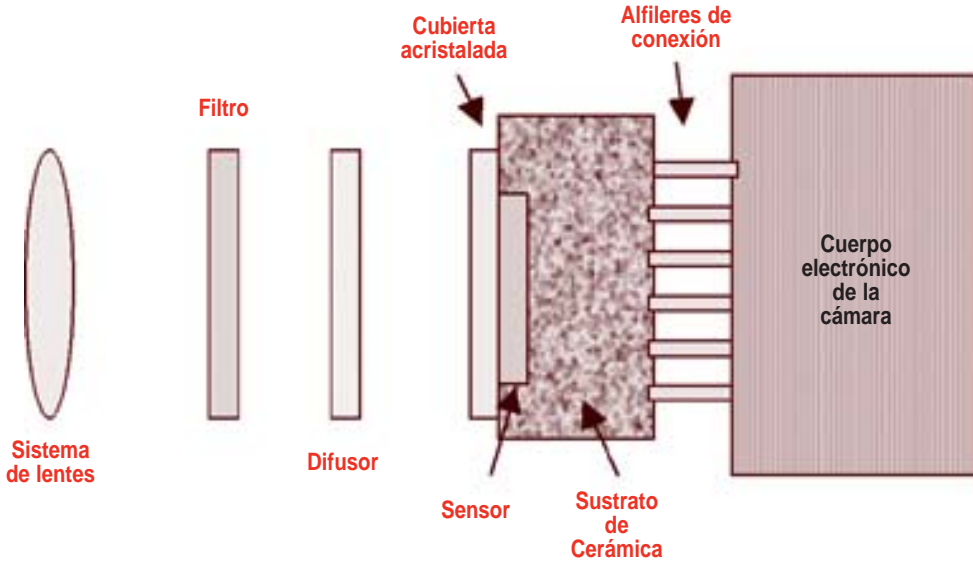
Por tanto el sensor o fotodiodo de una cámara digital será del tipo CCD (*Charged Coupled Device*) de doble carga, por tanto, que será el responsable de formar la imagen. Los fotodetectores del tipo CCD (lo llevan las cámaras de video y de fotografía caseras) se sitúan formado “arrays” (matrices) en un número que indicará el tamaño final de la imagen. Estos dispositivos se pueden colocar en forma lineal (y por tanto barren la zona sensible para formar la imagen) o en forma superficial (matricial o en dos dimensiones, fijos).

Estas diferencias técnicas dan lugar a los dos tipos de cámaras (sensores) aéreas digitales que hoy existen en el mercado, lineales y matriciales.

En un principio se apostó por temas económicos por el sistema matricial y posteriormente lineal, pero en la actualidad conviven ambos. El sistema lineal es de más fácil construcción y por eso se tiende a resolver el problema del otro mecanismo con sensores matriciales pequeños, de forma que para obtener una imagen del mismo tamaño que la lineal se unen 2 ó 4 sensores matriciales que toman las imágenes simultáneamente y las unen para formar una mayor, incorporando un sistema que compense el desplazamiento del avión durante la toma.

(1) Serafín López-Cuervo: “Fotogrametría digital”. Escuela de Ingenieros en Geodesia y Catografía U.P.M.

Figura 6
Estructura interna de una cámara digital



Según se aprecia en la figura 6, la cámara digital se compone de:

- Sistema de lentes (igual que en la analógica) cuya calidad influye en el resultado final de la imagen.
- Filtros. Se suelen situar entre la óptica y el sensor o delante de la lente y tienen diferentes utilidades:

1. Filtro de paso largo. Transmiten por encima del umbral de corte
2. Filtro de paso corto. Son contrarios a los de paso largo, transmite por debajo del umbral de corte.
3. Filtro de interferencia. Transmiten de forma homogénea en un rango limitado de longitudes de onda.
4. Filtros de color y dicróicos. Aumentan el contraste o aíslan regiones espectrales y colores.

5. Filtros de densidad neutra. Previenen el exceso de carga en los sensores ya que reducen la transmisión de energía.

Tipos de cámaras aéreas digitales

Presentación

Las actuales cámaras aéreas digitales ofrecen dos diferentes soluciones, la matricial y la lineal, posteriormente se describen detalladamente ambas.

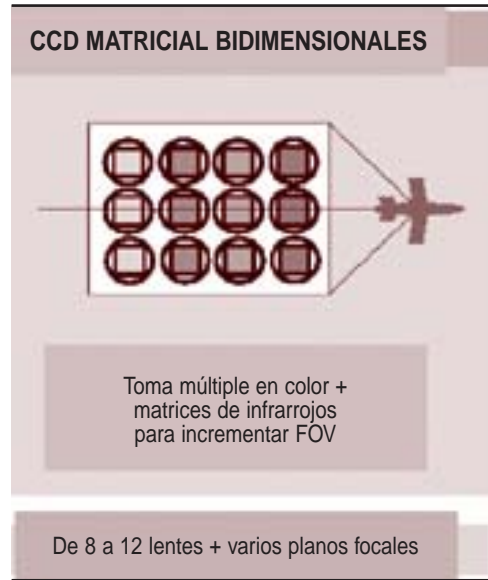
Las cámaras de línea barren el terreno de forma simultánea al avance del avión con 3 líneas pancromáticas. Tienen una única lente y un plano focal. Exponente de estas cámaras es la ADS-40 de Leica.

Las cámaras matriciales toman imágenes al modo de las cámaras convenciona-

Figura 7



Figura 8



les, tienen varios objetivos que disparan simultáneamente, unos en pancromático (rojo, verde y azul) y otros en infrarrojo. Cuentan con varios planos focales y funden las imágenes en una única.

Estas cámaras pueden constar en la actualidad de $nK \times nK$ elementos sensoriales (píxeles), siendo K 1024 elementos y n puede oscilar de 1 a 9. Los más utilizados son los $n = 3$ ó 4 . (por lo tanto 3.000×3.000 píxeles que son 9×10^6 píxeles, es decir 9 Megapíxeles). Están disponibles en pancromático, color ó falso color.

Son cámaras muy estables, de geometría conocida y que corrigen el movimiento hacia delante del avión (FMC). Trabajan con una definida perspectiva central. El principal inconveniente es la transferencia de los datos a suficiente velocidad y con suficiente precisión desde el sensor de estado sólido (CCD) hasta el medio de almacenamiento.

Se suelen utilizar de forma modular para solucionar los problemas de las matriciales sencillas (éstas se combinan de 2 en

2 ó de 4 en 4). Así se incrementa la dimensión sensorial de la toma, el ángulo de campo y la resolución espacial. Se acoplan a las monturas de las cámaras aéreas analógicas y tienen un tiempo de exposición entre 1 y 3.3 ms. con 12 bits.

Suele llevar también una cámara de video centrada en la montura. La imagen pancromática compuesta a partir de las 4 lentes convergentes se consigue pasando un proceso de muestreo y rectificación. Ejemplo de este sistema es la cámara DMC (Digital Modular Camera) DE Zeiss/Intergraph Imaging.

Principios de las cámaras digitales de línea

Características geométricas

El producto que se puede considerar representante de este tipo de cámaras es el sensor aerotransportado de LEICA llamado ADS 40 (figura 9)

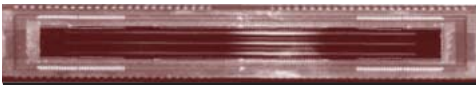
Figura 9



Entre sus características se encuentran contar con 8 sensores líneas CCD, todos situados en el plano focal, diseñados para requerimientos fotogramétricos y para tele-detección a baja altura:

- 3 CCD pancromático.
- 3 CCD (R+G+B)(Rojo+Verde+Azul).
- 1 CCD en el infrarrojo medio.
- 1 CCD en el infrarrojo térmico.

Figura 10



Cada uno de los CCD (figura 12) tiene 12.000 píxeles (X2), el tamaño de cada píxel es de 6,5 micras. Tiene una focal de 62,5 mm. y un ángulo de campo de vista (FOV) de 52°. La estructura electrónica del sensor está formada por dos arrays escalonados desfasados medio píxel. Estos sensores (figura 10) están sustentados en el plano focal con la disposición que se aprecia en la figura 11.

Disposición geométrica de las dos filas de fotodetectores en cada uno de los sensores pancromático (figura 12).

La toma de la imagen se realiza por barrido simultáneo en tres posiciones de la línea de toma, una hacia atrás otra hacia abajo (nadiral) y la tercera hacia delante.

Figura 11

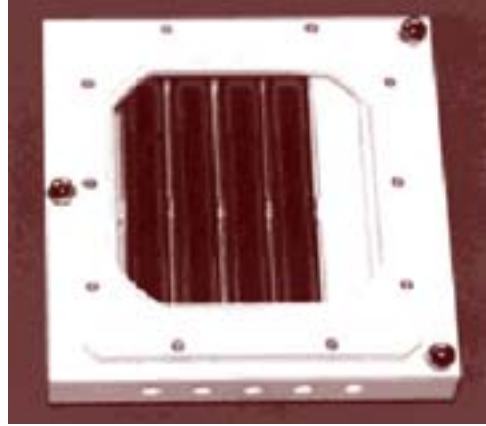
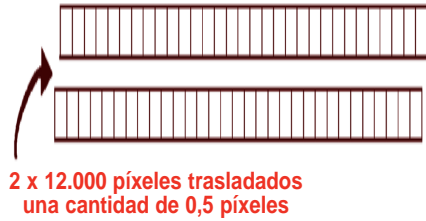


Figura 12



Posteriormente (en posproceso) se compondrán para formar una sola imagen (figura 13).

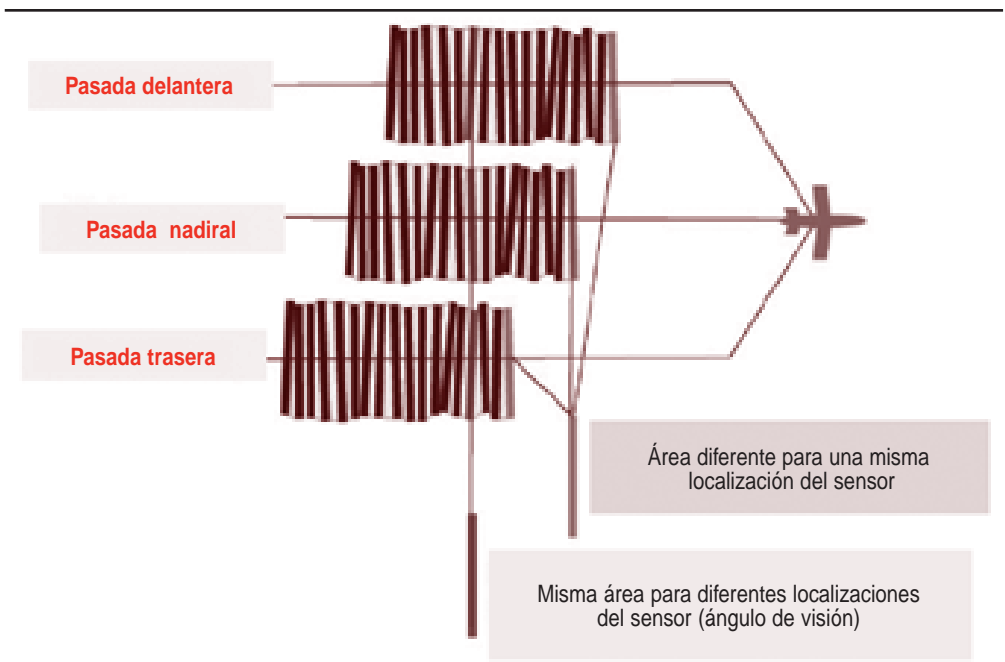
Descripción del principio de la imagen estereoscópica mediante LAS TRES LÍNEAS (Figura 14).

El principio en el que se basa el sistema de imagen estéreo con tres líneas consiste en que la cámara en el avión que sigue una trayectoria recta va tomando tres imágenes, una hacia delante, otra nadiral (vertical hacia abajo) y la última hacia atrás, por tanto para una única posición del sensor existen tres imágenes. Esas imágenes se combinan en posproceso para dar una imagen continua. También se puede apreciar que la misma zona aparece en tres diferentes localizaciones del sensor.

Figura 13



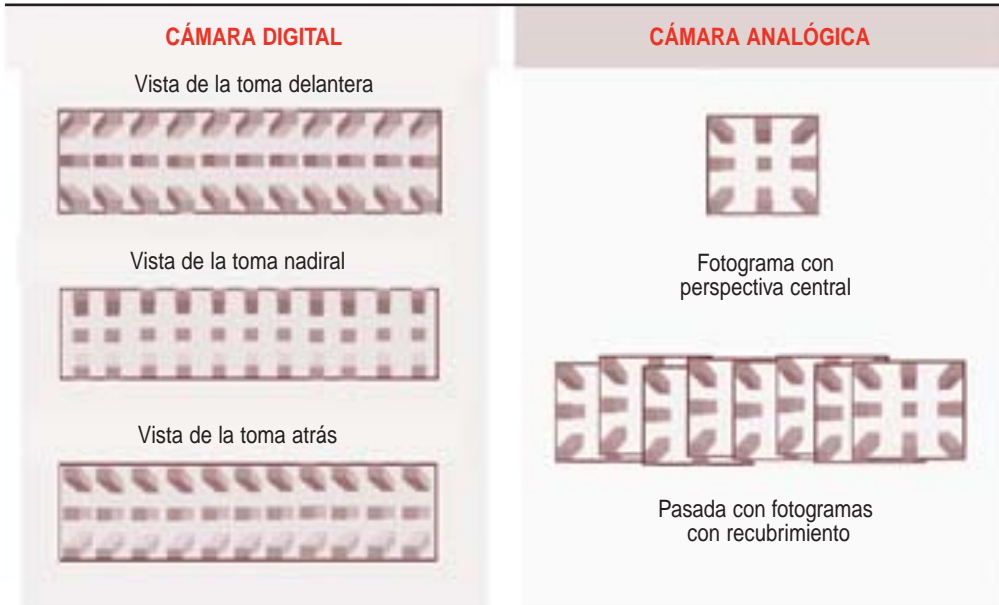
Figura 14
Principio de las 3 líneas para imágenes estereoscópicas



En la figura figura 15 se describe gráficamente el efecto que produce la perspectiva central en el sensor digital aerotransportado y en la cámara analógica. En el primer caso tenemos tres diferentes

pasadas con zonas en común para hacer posible su correlación. En el segundo caso, tenemos varios fotogramas con zonas en común de forma similar al anterior.

Figura 15
Efecto de la perspectiva central



Desventajas de la cámara digital de línea

- El sistema GPS-INS es totalmente dependiente de estaciones fijas en tierra, debe existir al menos una a menos de 30 km. Recibirá de ella datos entre 0,5 a 1 seg. Habrá que calcular y considerar la excentricidad de antena GPS con la cámara así como los datos INS.
- El objetivo ha de estar abierto permanentemente de forma que la radiometría viene influenciada por pasadas, toda la pasada tiene las mismas características. El tamaño píxel es función de la velocidad del avión, del obturador y del sistema de grabación. Sin embargo el color tiene una resolución completa.
- Es necesario implementar un nuevo flujo de trabajo:
 - nuevo software.
 - nuevos procedimientos.

- ya no existen modelos estereoscópicos.

Formación geométrica de las imágenes

Orientación

La imagen se adquiere durante el movimiento de avance del avión sobre el terreno, formando una pasada continua, por lo que la frecuencia de la cámara se ha de ajustar a la velocidad y altitud del mismo, por tanto ha de tomar cada línea de la imagen cada 0.00125 segundos. La imagen tiene deformaciones por los movimientos del avión, por lo que habrá que rectificarla en posproceso.

Para que sea eficiente el sensor, ha de utilizar un Sistema de Navegación Inercia asistido por GPS que dé posición y orientación a cada línea en cada instante. Este sistema estará formado por una Unidad de Medida Inercial (IMU), por un receptor

GPS bifrecuencia y por un ordenador (POS) que procese ON-line toda esa información. El IMU graba cambios instantáneos en la posición y orientación de la cámara 200 veces/segundo y sirve para definir la trayectoria entre dos orientaciones GPS.

Rectificación de imágenes

Después de procesar todos los datos de orientación, esos ficheros se utilizan para rectificar las imágenes. Estas se proyectan sobre un plano terrestre a una cota determinada, obteniendo una imagen estándar, georeferenciada y preparada para el procesamiento en fotogrametría y teledetección. La imagen sin corregir sería una composición de las tres imágenes de línea de la figura 17.

Principios de las cámaras digitales matriciales

El otro tipo de cámaras digitales es el matricial. En este caso las imágenes no se obtienen de forma continua sino en sensores modulares matriciales simultáneamente. Dos son sus representantes en el panorama comercial, la Vexcel Ultracam de Inpho (figura 16) y la Z/I DMC de Zeiss/Intergraph (figura 17).

Estas cámaras combinan varios objetivos en su plano focal, produciendo imágenes matriciales parciales que se unifican en una imagen completa en posproceso. Una de ella mediante cuatro imágenes y la otra mediante seis imágenes. Vamos a presentar brevemente las dos principales cámaras digitales matriciales.

VEXCEL: ULTRACAM D (Inpho)

Está conformada por 4 objetivos pancromáticos (B/N) compuesto cada uno por 11.500 x 7.500 píxeles y por otros 4 objetivos matriciales multiespectrales (R,G,B,IR) (rojo, verde, azul e infrarrojo) de 4000 x 2672 píxeles cada uno (figura 20). La focal de los objetivos es de 100 mm y su luminosidad de $f : 1,56$. Cada uno de los píxeles (fotodetectores) tiene un tamaño de 9 x 9 micras y la amplitud (ancho por largo) de su campo de visión (FOV) es de $55^\circ \times 37^\circ$.

Los 4 módulos pancromáticos se encuentran dispuestos formando haces convergentes de forma que adquieren cuatro imágenes del terreno distintas pero con unas zonas comunes para unir todas en una imagen global.

La formación de las imágenes se realiza formando un mosaico de las imágenes a partir de los citados módulos pancromáti-

Figura 16
Cámara+memoria+monitor (Ultracam)



Figura 17
Vista de los 8 objetivos

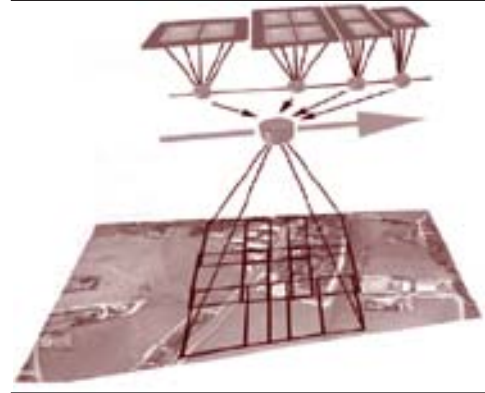


cos, a partir de ahí se forman las combinaciones a color natural o falso color, mediante los otros cuatro objetivos color. Es decir, se combinan las imágenes en color (R,G,B) con las imágenes en B/N (pancromáticas) mediante puntos comunes, añadiendo una más de Infrarrojo. Todas las imágenes se producen en un “disparo simultáneo”, tal y como se aprecia en la figura 18.

Los pasos que llevan a la formación de la imagen completa se presentan en la siguiente serie de ilustraciones.

En primer lugar entra en funcionamiento el cono principal ó maestro con 4 matrices de imagen (figura 19). En el segundo paso el primer cono “esclavo” introduce dos imágenes de forma vertical en el centro de las primeras, creando cuatro áreas de solape. En el tercer paso, el segundo cono “esclavo” coloca otras dos imágenes en horizontal creando nuevas áreas de solape y por último el tercer cono

Figura 18
Formación de imágenes en la cámara Ultracam



“esclavo” coloca una nueva y última imagen uniendo y solapando todas las anteriores.

Figura 19

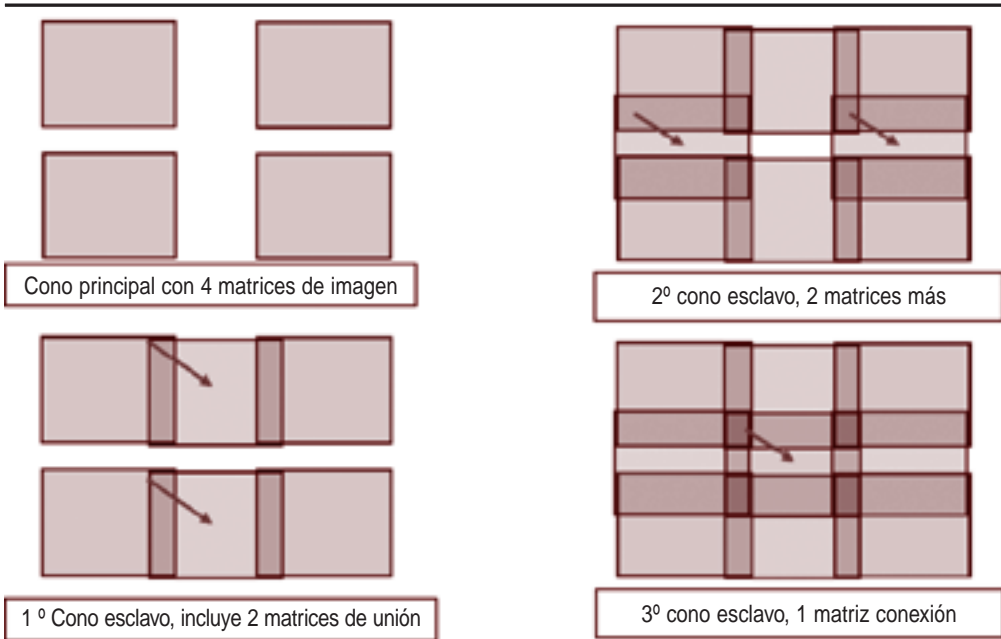


Figura 20

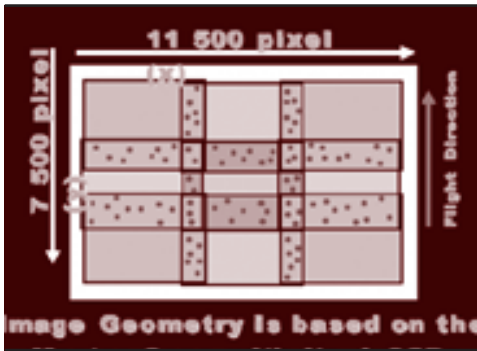


Figura 21



La imagen final cuenta con 9 matrices de imagen superpuestas con zonas de recubrimiento. En esas zonas los puntos comunes sirven para crear en posproceso una imagen única en la que se combina información pancromática con color e infrarrojo.

**DMC (Zeiss/Intergraph).
Digital Metrical Camera**

Componentes del sistema y disposición en el avión:

La cámara se sitúa en la ubicación tradicional, en una perforación del fuselaje, conectada a diferentes elementos que componen el equipo global (figura 22), estos son:

- Centro de control del sistema IMU (Inertial Measure Unit)
- Discos de almacenamiento masivo
- Interface del navegador

A su vez el piloto mediante el “Plot display” puede ir siguiendo todo el trabajo que se realiza y la ruta de navegación. El sistema GPS mediante el control del sensor interconecta al piloto con la cámara y permite detectar posibles variaciones de la trayectoria. Es necesaria una perfecta ubicación de la cámara con respecto al receptor GPS, conociendo todos los vectores de situación para así poder calcular las coordenadas de los puntos de toma de forma continua.

Cuadro 2
Características técnicas de la cámara Ultracam

Formato de Imagen	13.824 x 7.680 píxeles
Tamaño CCD	12 micras
Distancia Focal	120 mm
Sistema GPS/INS	Integrado en el sistema
Resolución radiométrica	12-bit/Canal
Canales espectrales	Pancromático, Rojo, Azul, Verde, IR cercano
Compensación FMC	Electrónica TDI (Time Delay Integrated)
Almacenamiento en vuelo	2.200 imágenes
Ángulo de campo	69.3° en sentido trasversal a la traza y 42° en el sentido de la traza
Disparador, apertura	Variable de 1/50 a 1/300 seg. f/4-f/22

Figura 22
Componentes del sistema y disposición en el avión

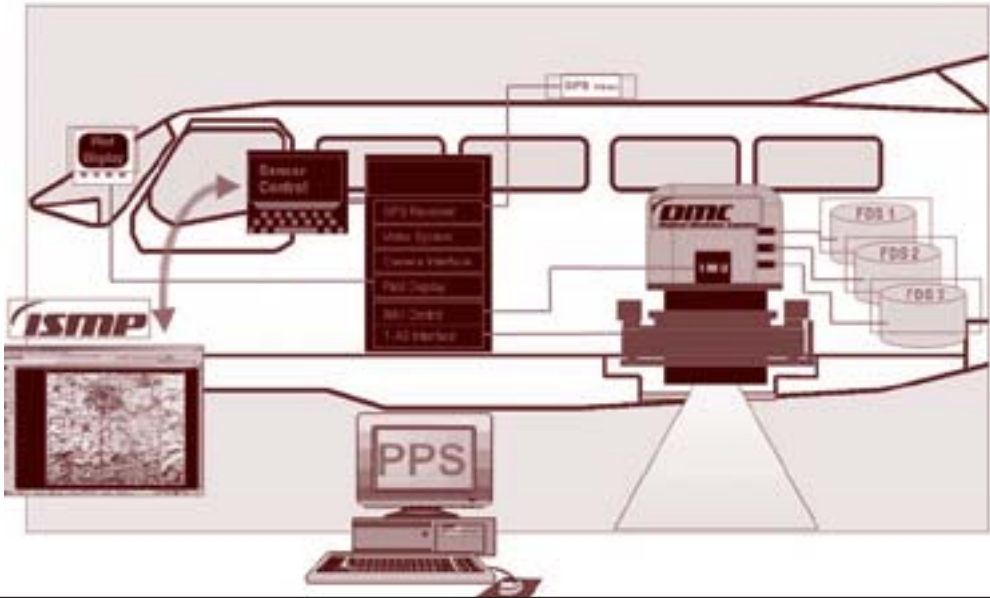


Figura 23
Objeto movido sin compensar

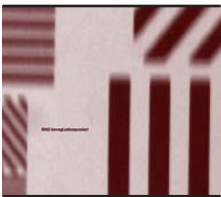


Figura 24
Objeto movido compensado



Un dispositivo que incorpora el sistema y que es de gran importancia para mejorar la calidad de las imágenes es el *Forward Motion Compensation* (FMC) mediante *Time Delayed Integration* (TDI). Este permite compensar el movimiento hacia delante del avión que provoca una clara falta de definición de los objetos fotografiados (figuras 23 y 24), convierte

sus límites en borrosos como podemos ver las imágenes, tanto su efecto (izda.) como su solución (dcha.). El sistema utilizado (TDI) utiliza la captación previa de la imagen y posteriormente un retraso en el tiempo de incorporación a la matriz definitiva.

El esquema de funcionamiento del sistema FMC (figura 25) consiste en que el sistema va capturando las imágenes en RGB y en vez de situarlas directamente donde les correspondería, van saltando a la siguiente posición hasta que mediante el retraso correspondiente son situadas en la última línea de la matriz imagen ya compensadas.

Sistema de almacenamiento de datos en vuelo

Uno de los principales problemas de esta nueva tecnología es el enorme tamaño

Figura 25

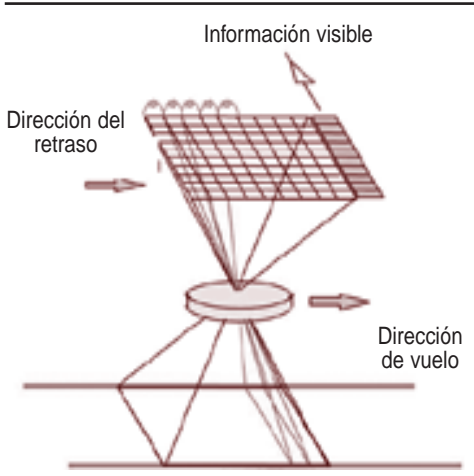


Figura 26



de los ficheros que provienen de las tomas aéreas digitales. Hay que tener en cuenta que cada imagen está compuesta por matrices de 14.000 x 8.000 píxeles y eso implica ficheros muy pesados.

Es por ello que se ha de contar con sistemas de almacenamiento rápidos, eficaces y manejables, para que nada más tomar tierra el avión se puedan transportar con facilidad a las oficinas para su proceso. En el caso de la cámara DMC, por ejemplo, el sistema está compuesto por tres FDS (Flight Data Storage devices), es decir dispositivos para almacenamiento de datos en vuelo. Su aspecto es el de la figura 26.

Este sistema está presurizado y es totalmente hermético. Para interconectar los módulos entre sí y ellos al sistema sensor se utilizan cables de transmisión de información paralelos de fibra óptica. La velocidad de transmisión de información es de 136 MB / s. La capacidad de almacenamiento total del sistema es de 840 GB, lo que equivale a 2240 imágenes, cada una de ellas en pancromático, color (RGB) e infrarrojo que equivaldría a 1250 imágenes de fotografías aéreas de 9”.

Sistema de tratamiento de datos en posproceso

Como podemos apreciar en la imagen (figura 26), la cámara está conectada a los sistemas FDS por tres cables de fibra óptica. Una vez en gabinete los tres sistemas de almacenamiento, se conectan a un PC que mediante una estación de copia, pasa los datos a cinta o a disco.

La estación de posproceso (PPS-Post-Process_Station) está dotada de un gran disco de acceso rápido de 3,6 TB, y mediante dos motores de procesamiento de gran capacidad que son el Radiométrico y el Geométrico va a calcular todos los parámetros necesarios para formar la imágenes fotogramétricas.

Procesado geométrico de la imagen

El objetivo de la cámara DMC Z/I está compuesto por 8 conos. De ellos, 4 son pancromáticos y cubren cuatro diferentes zonas de la matriz rectangular de la ima-

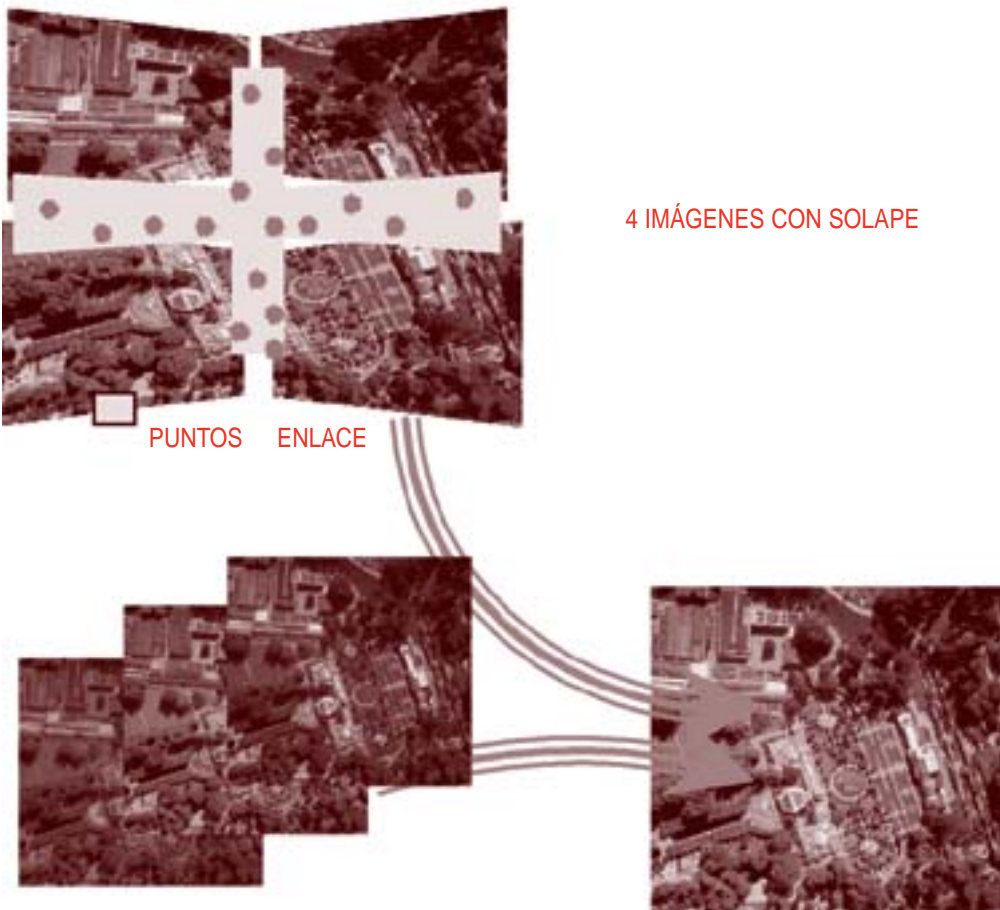
gen. Esas zonas tienen solape entre ellas y en posproceso se unifican para obtener la imagen definitiva. Con estos cuatro conos se consigue una alta resolución geométrica (12 micras) que es la que realmente da el detalle de la imagen final. En el cuerpo de la cámara va montada también una cámara de vídeo para ayuda a la navegación y enriquecimiento de la información.

Otro conjunto de conos son los que aportan el color. Uno por cada color pri-

mario (RGB (red, green, blue)). Cada uno de ellos obtiene una imagen de la superficie total de la matriz, y son los que “colorean” la imagen pancromática, aunque no aportan una gran resolución geométrica (40 micras). Por último el cono de infrarrojo funciona igual que los de color pero en esa zona del espectro.

Por ejemplo en FR, obtendremos un solo fichero compuesto por Pan 1,2,3 y 4. Si queremos Infrarrojo en color se combi-

Figura 27
Procesado geométrico de la imagen

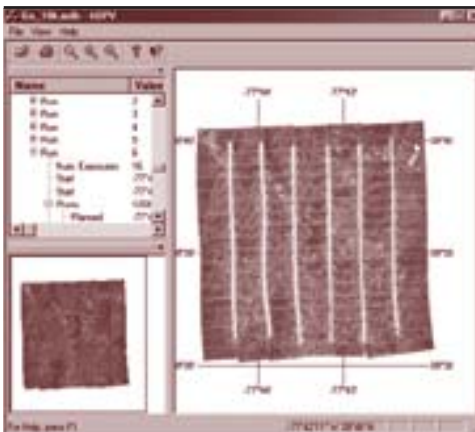


narán Pan 1,2,3 y 4 con RGB en un solo fichero. Si lo que buscamos es color en CR (Baja resolución) tendremos tres ficheros, uno en cada color. El esquema gráfico del funcionamiento sería el que se presenta en la figura 27, en él se muestra la formación del mosaico de imágenes. Las cuatro tomas pancromáticas unidas mediante un ajuste robusto utilizando puntos de enlace de chequeo y aplicando los parámetros de calibración necesarios pasa de una proyección particular a una perspectiva central adecuada. Se funden, en resumen las imágenes pancromáticas, color e infrarrojo.

Sistema de navegación, información en vuelo

El software adecuado permite al piloto y fotógrafo disponer on-line de información de vídeo de la zona que se sobrevuela. Simultáneamente se muestra información sobre el estado del proyecto de vuelo en tiempo real, incluyendo líneas de vuelo, centros de imagen, superficie de cada fotograma y recubrimiento. También se cuenta con un fotomosaico (figura 28) de la zona a levantar obtenida previamente o mediante la cámara de vídeo.

Figura 28



Comparativa de cámaras matriciales

Aspectos a tener en cuenta en la comparativa

Para elegir un determinado equipo frente a otros es necesario tener en cuenta las siguientes cuestiones:

- Parámetros geométricos similares a las cámaras analógicas (focal 150 mm).
- Pixel de 12 micras, lo que implica más luminosidad por píxel.
- Mayor área de imagen en terreno (>20 %).
- Más robustez de construcción.
- Sistema de almacenamiento y descarga, extraíble del avión.
- Video cámara y registro de imágenes.
- Compatibilidad con equipos de cámaras analógicas.
- Plataforma giro-estabilizada (TA-S).

Si comparamos anchos de barrido iguales, es decir que las cámaras objeto de la comparación barran la misma anchura de la pasada en el terreno, los tamaños de píxel variarán y también las alturas de vuelo, de forma que si la Cámara Analógica con focal de 150 mm. obtiene un píxel terreno con una superficie de 100 cm^2 (por ejemplo), la Z/I – DMC obtendría un píxel terreno de 111 cm^2 y la Vexcel – Ultracam de 133 cm^2 . Por lo tanto al aumentar el tamaño del píxel la resolución es menor.

En cuanto a las alturas de vuelo, podemos apreciar en la figura 29 que para una misma anchura de barrido y si la altura de vuelo de la cámara analógica es 100, la altura de vuelo de la DMC es de 111 y de la Vexcel de 148. Esto implica que la altura media de vuelo es notablemente más alta en el caso de Vexcel debido a su focal más larga.

Figura 29
Alturas de vuelo



Comparativa de sensibilidad a la luz

En la elección de la cámara digital adecuada es también importante considerar el tamaño del CCD que lleva incorporado. De forma que un CCD de 12 micras tiene el 77 % más de sensibilidad a la luz que un elemento de 9 micras.

Por tanto, un elemento mayor de CCD implica mayor sensibilidad a la luz y por tanto mejor calidad de imagen y más detalles en las sombras.

Se ha de tener en cuenta que un mayor tamaño de píxel en combinación con 12 bit por píxel produce mucho mejor resultado incluso con malas condiciones meteorológicas.

Comparativa de tamaño de imagen final

Si comparamos el tamaño en píxel y en mm. de las dos cámara digitales (DMC y Vexcel respectivamente), obtenemos los datos de la figura 30.

Aplicaciones temáticas de las cámaras digitales

Los sensores de las cámara digitales (2), tal y como hemos visto, portan varios canales diferentes, no sólo de luz visible, sino infrarrojo, pancromático, etc... Esto permite llevar a cabo investigaciones de carácter temático además de las conocidas cartográficas.

Como existen canales separados para el azul, verde, rojo e infrarrojo, se pueden obtener documentos de ocupación de suelo, investigación y control de plagas en las cubiertas vegetales, identificación de cambios en la vegetación debido a sequías, tipo de cultivo (catastro), análisis de tormentas, localización de capas de hielo y arqueología, entre otras aplicaciones.

Cada uno de los canales tiene una utilidad práctica concreta que otro canal no puede realizar, por ejemplo:

El canal azul es muy útil para conocer la dispersión de las partículas en la atmósfera, esto permite que el sensor reciba información de las zonas en sombra de la imagen. Esta es una clara ventaja frente a las cámaras analógicas que tienen dificultades para distinguir detalles en estas zonas.

Para obtener documentos de usos del suelo y desarrollo urbano se utilizan combinaciones de varios canales y sirven para planificar el tráfico en ciudades y para proteger la naturaleza. También se pueden detectar desastres naturales y fenómenos de erosión de costas.

Para la investigación de nubes se usan los canales rojo, verde y azul sobre todo esta última banda que penetra en la estructura de estas acumulaciones de vapor de agua.

(2) Ranier Sandau. "New Potential and applications of ADS40". Congreso de Amsterdam, Octubre de 2000. International Society for Photogrammetric and Remote Sensing.

Figura 30
Comparativa de cámaras matriciales. Comparativa de tamaño de imagen final

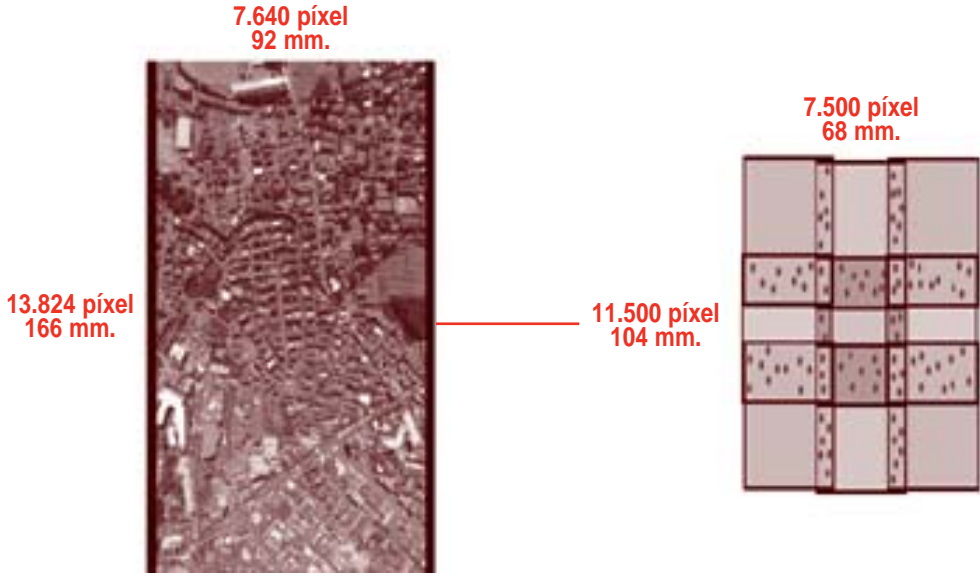
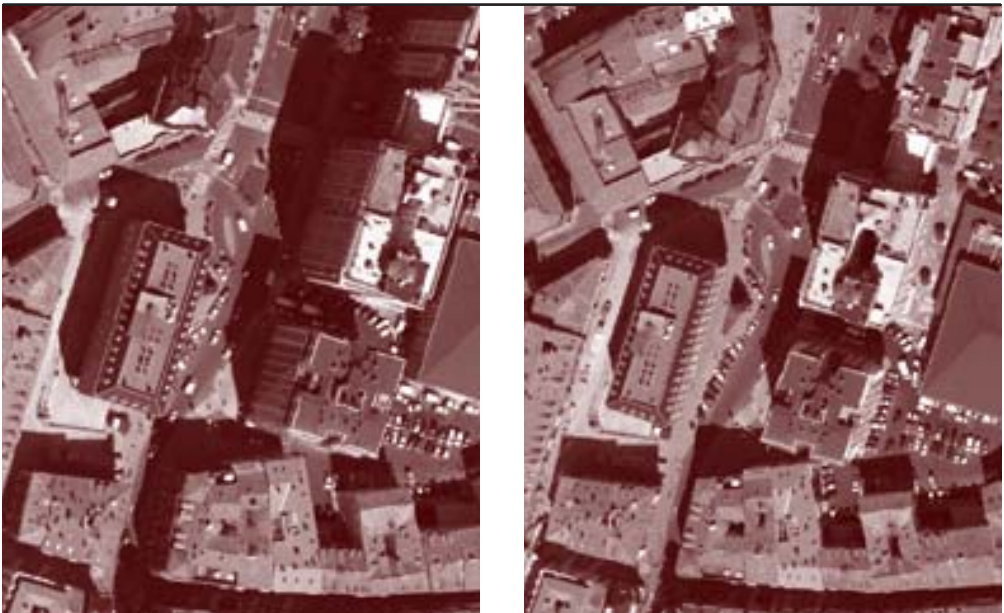


Figura 31
Cámara digital fotogramétrica en el Catastro



Es posible también llevar a cabo un control de zonas acuosas con los canales azul y verde a través de estudios sobre la proliferación de la biodiversidad en lagos y embalses en los que aparece contaminación orgánica por *eutrofización* (aumento de la materia orgánica disuelta en el agua). De forma similar combinando estos dos canales con el infrarrojo próximo permite la detección de vertidos de petróleo.

Para controlar la vegetación y obtención de índices o tasas de cubiertas vegetales se usan los canales verde, rojo e infrarrojo. Las mediciones con estos canales a intervalos de tiempos regulares informan sobre los efectos climáticos inducidos en la biosfera.

También permiten calcular índices de vegetación y parámetros de biomasa para estimar mediante modelos el rendimiento de las cosechas y el índice de dióxido de carbono en la atmósfera que sirve para estudiar la variabilidad climática por medio de la evaluación de la evapotranspiración.

El uso de los canales rojo e infrarrojo cercano en combinación permiten clasificar los diferentes tipos de vegetación para la planificación agraria considerando la protección de los biotopos ecosistemas y diversidad de especies. La selección de los canales espectrales se hizo de acuerdo con las ventanas atmosféricas, teniendo en cuenta donde es menor la absorción de la radiación electro magnética por parte de la atmósfera.

La cámara digital fotogramétrica en el catastro urbano

La elaboración de cartografía catastral urbana necesita de imágenes métricas aéreas de la más alta calidad. Las nuevas cámaras digitales ofrecen muchas ventajas. Una alta resolución, gran densidad de información, sobre todo en zonas de sombra (figu-

ra 31) y una gran disponibilidad en el tiempo (al no tener que escanear, se puede disponer del vuelo en un plazo muy corto).

En este ejemplo de par estereoscópico de una zona urbana de Burgos, vemos la importancia de tener detalle en las sombras, ya que en zonas urbanas de edificios altos éstas tienen gran extensión. Por otro lado, se aprecian muy bien los ocultamientos de grandes zonas debidos a los abatimientos de los edificios.

En otro artículo del mismo autor se describía el proceso para la elaboración de True-Ortho (ortofotos que eliminan el abatimiento y muestran información de las zonas ocultas debido a una corrección en la proyección). Este sistema extraería información de las zonas donde un edificio oculta una parte de las fotos adyacentes.

Bibliografía

MIKAEL HOLM, Espoo, *An integrated approach for orthoimage production* (2003).

LERMA GARCÍA, J.LUIS, Universidad Politécnica de Valencia. *Fotogrametría moderna; Analítica y Digital* (2002).

GÓMEZ, ALFONSO. Stereocarto España. *Proceso digital en fotogrametría* (2000).

JOSEF BRAUN, INPHO GMBH, Stuttgart, *Aspects on True-Orthophoto Production* (2003).

MIGUELSANZ MUÑOZ, PEDRO. U.P.M. *Apoyo aéreo cinemático y aerotriangulación digital frente a los sistemas de navegación inercial: Análisis de Precisiones*. Madrid (2004).

HINZ, ALEXANDER *The Z/I Imaging Digital Aerial Camera System*. Stuttgart (1999).

MICHAEL E. HODGSON & PATRICK BRESNAHAN. University of South Carolina. *Accuracy of airborne Lidar-Derived elevation: Empirical Assessment and error budget*. (2003). ■