

## DETERMINACION DEL MODELO DE ELEVACIONES DEL TERRENO (MET) MEDIANTE CORRELACION DIGITAL DE PARES ESTEREOSCOPICOS

Román ARBIOL; Vicenç PALA  
Institut Cartogràfic de Catalunya. Balmes 209-211. 08006 BARCELONA

### RESUMEN

La correlación digital de imágenes es una técnica que trata de buscar correspondencias en un par de imágenes estereoscópico, de forma que puedan establecerse los paralajes y extraer las elevaciones de los puntos.

Se presentan en esta comunicación varios algoritmos que pretenden determinar dichas correspondencias existentes en la imagen, filtrar las correspondencias erróneas e interpolar resultados en las zonas sin datos. También se van a mostrar algunos ejemplos de aplicación de estas técnicas sobre fotografía aérea y sobre imágenes de satélite.

**Palabras clave:** Estereoscopia, Correlación de imágenes, Modelo de elevaciones del terreno, Corrección geométrica.

### ABSTRACT

Digital image correlation is a new technique to search for point correspondence determination on an image stereopair, establishing parallaxes and elevations.

We present a few algorithms to find those point correspondences existing on the images, to filter out bad ones, interpolating elevations in the areas without information. We will show a few results provided by these techniques over aerial photographs and satellite images.

**Key words:** Stereoscopy, Image correlation, Digital terrain models, Geometrical correction.

## 1. INTRODUCCION

Podemos definir el Modelo de Elevaciones del Terreno (MET) como una representación digital del relieve de una zona en la que se dispone de una medida precisa de la altura sobre el nivel de referencia para un conjunto significativo de puntos localizados geográficamente.

La realización de correcciones geométricas de imágenes de teledetección exige cada vez más un conocimiento estricto del relieve de la zona a estudiar. Conocidos los parámetros de orientación de la imagen a tratar y el modelo de elevaciones del área se puede conocer qué distorsiones presenta la imagen y, por tanto, reconstruir una nueva imagen libre de esas distorsiones. (Ref<sup>a</sup> 1).

También la aparición de los Sistemas de Información Geográfica y la necesidad de introducirles información significativa del territorio conduce a la determinación de variables descriptivas del terreno directamente derivables del MET, como la pendiente y la orientación.

La determinación de modelos de elevación del terreno se obtiene, fundamentalmente, de tres formas:

- digitalización de curvas sobre mapas topográficos.
- realización de perfiles mediante un restituidor analítico.
- correlación digital de imágenes.

Cada una de estas técnicas presenta sus ventajas y sus inconvenientes. No vamos a discutir aquí la primera, vamos a hablar un poco de la segunda y nos centraremos rápidamente en la tercera opción.

## 2. CONSTRUCCION DEL MODELO DE DEFORMACION

La observación de un territorio mediante un sensor remoto como una cámara fotográfica o una serie de sensores produce una representación bidimensional de ese territorio donde se proyecta la posición tridimensional de los diferentes puntos del mismo. La situación que ocuparán los puntos sobre la imagen es fácilmente calculable a través de los parámetros de observación usando la geometría proyectiva. Igualmente, si disponemos de dos vistas, en diferentes posiciones, de un punto es posible restituir su situación tridimensional a través de la misma geometría proyectiva.

En cualquier caso se supone que se conocen los parámetros de orientación de las imágenes, en el caso de las fotografías las posiciones y los ángulos de actitud y, para el caso de las imágenes SPOT, las tablas que definen las posiciones de los centros de las líneas y sus parámetros de actitud. Toda esta información permite, dado un punto con coordenadas x, y, z, encontrar la posición dentro de las dos imágenes o, dados dos puntos en las imágenes, encontrar las coordenadas tridimensionales que representan, todo ello utilizando las ecuaciones de colinearidad.

El problema clave es, pues, la determinación de puntos homólogos entre dos o más imágenes. La aproximación tradicional a este problema es la asignación manual utilizando un restituidor analítico lo que presenta dos dificultades fundamentales:

- La generación masiva de MET ha de considerar una gran cantidad de puntos, tanto mayor cuanto más "complejo" es un terreno, lo que impone una dedicación considerable de recursos humanos y de equipamiento. A título de ejemplo, una hoja del MTN 1:50.000 tomando un punto cada 100 m necesitaría del orden de 50.000 puntos.
- La precisión de la restitución está muy ligada a la velocidad de tratamiento de la información, de forma que cuando más rápido se pretenda determinar el MET peor precisión se obtendrá.

Parece pues conveniente estudiar la realización de un método más o menos automático de generación de MET.

## 3. UNA APROXIMACION SENCILLA

Una primera alternativa para el uso de la correlación es la Correlación Cruzada (CC). (Ref<sup>a</sup> 2). En esta aproximación, para un punto de una imagen, que tomaremos como referencia, se estima la elevación que presenta en el terreno lo que permite evaluar la zona donde debe encontrarse el punto homólogo correspondiente en la otra imagen. Alrededor del punto de referencia tomamos una ventana que presente suficiente textura para permitir la correlación, digamos un cuadrado de 15 pixels de ancho. Alrededor del punto en la otra imagen definimos una ventana suficientemente grande como para contener el punto que estamos buscando, por ejemplo de 100 pixels de ancho, donde se moverá una subventana de 15 pixels de ancho y para la que iremos calculando su similitud con la ventana de referencia. Allí donde encontremos la mayor similitud, allí definiremos que existe correspondencia entre los puntos centrales. Naturalmente deberemos definir esa similitud a través de algún algoritmo calculable. El más usado es la CC definido como:

$$CC = \frac{\sum_{i,j} (M(i,j) - M^{(*)}) \times (R(i,j) - R^{(*)})}{STD(M) \times STD(R)}$$

donde:

STD = Es la división tipo en la ventana.

M(\*) = Es la media de los valores en la ventana.

Este método de correlación es muy sensible a la presencia de diferencias de escala entre los objetos visualizados o a la presencia de rotaciones en la imagen, lo que conduce a la necesidad de eliminar esas diferencias antes del proceso. En cualquier caso y ante zonas de elevada pendiente las diferencias entre las dos ventanas pueden ser lo suficientemente grandes como para imposibilitar una buena correlación.

#### 4. UNA APROXIMACION MAS COMPLEJA

Esta aproximación se denomina Correlación por Mínimos Cuadrados (CMC). En este caso se postula que las diferencias entre dos ventanas de las mismas dimensiones pueden corregirse deformando una de ellas mediante una transformación afín. Se trata pues de minimizar las diferencias (Refª 3):

$$CMC = \sum_{i,j=1}^n (F_1(i_1, j_1) - F_2(i_2, j_2))^2$$

siendo:

$i_2' = a_0 + a_1 * i + a_2 * j$  y  $F_1$  los valores de gris de la imagen 1

$j_2' = b_0 + b_1 * i + b_2 * j$  y  $F_2$  los valores de gris de la imagen 2

La resolución por mínimos cuadrados de este problema conduce a un sistema de ecuaciones lineales para los parámetros de la transformación que permite, mediante aproximaciones sucesivas, determinar qué punto en la segunda imagen conduce a una minimización de las diferencias radiométricas de las dos ventanas. Una consecuencia interesante de esta aproximación es que se dispone de un estimador de lo lejos que nos encontramos de un mínimo local. Esto último debe tomarse con reservas pues un mínimo local puede darse también en un lugar equivocado.

#### 5. NUEVOS PROBLEMAS

Esta aproximación permite solventar los problemas introducidos por una elevada pendiente, pero introduce otros nuevos:

- Las dos ventanas iniciales deben tener una zona de solapamiento para que en los movimientos sucesivos se llegue a la superposición, lo que quiere decir que antes de empezar debemos disponer de buenas aproximaciones iniciales.
- No se resuelven los problemas derivados de la falta de textura, por ejemplo sobre zonas arenosas o con cubiertas de nieve o hielo.
- Tampoco se resuelven los problemas derivados de texturas lineales, por ejemplo, el producido por la presencia de carreteras rectas.
- Tampoco se resuelven los problemas derivados de texturas repetitivas, con la formación de máximos múltiples.
- Tampoco hay respuesta al problema de las oclusiones o las discontinuidades.

En cualquier caso el problema más importante es el de los errores provocados por ajustes fuera de lugar (mínimos locales). Veamos formas de detectar esos errores:

- Analizando los residuos de la función; es decir, calculando la suma de las diferencias radiométricas en el mejor ajuste. Estos residuos serán tanto más grandes cuanto más lejos se encuentre un punto de su correcta correspondencia, lo que debería permitir marcar un punto como sospechoso.
- Analizando el comportamiento de los parámetros de la transformación afín, dado que estos parámetros vienen a resituar espacialmente los planos que definen las deformaciones de las ventanas y estos planos en ventanas contiguas deben enlazarse de forma suave.
- Comparando los valores de altura derivados con los que presentan los de la vecindad puesto que la función que describe el relieve debe ser una función continua. Esto permite filtrar aquellos puntos aislados producidos por una mala correlación dado que los picos o los pozos producidos no son coherentes con su entorno.
- Introduciendo limitaciones geométricas en el movimiento de la ventana de correlación como, por ejemplo, el de que este movimiento debe realizarse a lo largo de la línea epipolar que es aquella línea producto de la intersección del plano imagen y el definido por los centros de observación y el punto considerado. Esta construcción, que se reduce a una línea recta sobre las imágenes aéreas, se define a través de una tabla sobre las imágenes SPOT debido a que sus parámetros de orientación externa varían con el tiempo (Refª 4).

## 6. RESULTADOS

Zona de prueba	Penedés
Tipo de sensor	Foto aérea 1:22.000
Dimensión del píxel sobre el terreno	50 cm (22 $\mu$ sobre la foto)
Número de puntos	2.704
RMS (z)	1,18 m

Las medidas de referencia para la medida de los valores de altura fueron tomadas según una malla regular uniformemente distribuida mediante un restituidor analítico WILD-AC1.

Zona de prueba	Aix-en-Provence
Tipo de sensor	SPOT pancromático
Dimensión del píxel sobre el terreno	10 m
Número de puntos	1.250
RMS (z)	9,3 m

Las medidas de referencia para la medida de los valores de altura fueron leídas de una cinta con el modelo digital del terreno proporcionado por el IGNF.

## 7. CONCLUSIONES

La primera conclusión que es posible extraer, a la vista de los primeros resultados obtenidos mediante esta técnica, es que la correlación digital proporciona resultados comparables a los obtenidos mediante las técnicas tradicionales. Su mayor inconveniente es que los algoritmos empleados hasta ahora son potentes y robustos pero poco inteligentes. Como ejemplo, un operador humano puede colocar cotas en la planta baja de una casa o en el suelo de un bosque a través del contexto de la escena que está visualizando mientras que el ordenador, de momento, nos proporcionará únicamente cotas situadas sobre el tejado de las casas o la copa de los árboles. Otra dificultad presente es la de determinar efectivamente los puntos correlacionados en mal lugar. La solución en la que estamos trabajando utiliza una pantalla estereoscópica que permite a un operador validar un conjunto de puntos por observación directa de una malla derivada situada sobre el terreno.

## REFERENCIAS

1. Palà, V. y Arbiol, R. 1987. Corrección geométrica de imágenes SPOT utilizando el modelo digital del terreno., En **II Reunión Nacional del Grupo de Trabajo en Teledetección**: 95-101. Valencia. Asociación Española de Teledetección.
2. Lemmens, M. 1988. A survey on stereo matching techniques. En **16th ISPRS Congress**: 11-23 Kyoto.
3. Gruen, A. and Baltsavias, E. 1987. High-precision image matching for digital terrain model generation. **Photogrammetria**. **42**: 97-112.
4. Masson d'Autume, G. 1984. Corrélation numérique d'images quelconques, selon les lignes quasi-epipolaires, par approximations successives. **Bul. SEFPT**. **95**: 23-32.