

AJUSTE DE MODELOS DIGITALES DE ELEVACION EN BASE A PUNTOS MEDIDOS EN EL TERRENO

Pablo A. Euillades, Victor A. Bonfils, Mauro H. Blanco

Instituto CEDIAC, Facultad de Ingeniería
Universidad Nacional de Cuyo, Casilla de Correo 405, Mendoza (5500), Argentina

Marcelo J. Vénere

Comisión Nacional de Energía Atómica
PLADEMA - UNCPBA - ISISTAN, Pinto 399, Tandil (7000), Argentina

RESUMEN

La construcción de un Modelo Digital de Elevación (MDE) a partir de imágenes satelitales ópticas y de radar permite modelar la topografía de áreas extensas con elevada resolución. Sin embargo, el hecho de reconstruir topografía con datos adquiridos desde 800km de altitud introduce errores de diverso origen que se reflejan en el producto final. En el presente trabajo se propone un método de corrección de MDEs construidos con estas técnicas a partir de una serie de puntos medidos en el terreno. Dicho método consiste en efectuar una traslación rígida que lleve al MDE a un ajuste óptimo y posteriormente deformarlo elásticamente de manera que los puntos medidos se desplazan en su error remanente, evaluándose los movimientos del resto de los puntos del MDE mediante interpolación. Finalmente se aplica el método a un caso real, en el que un MDE construido mediante estereoscopia de imágenes SPOT es corregido en base a 28 puntos medidos en el terreno.

ABSTRACT

Digital Elevation Model (DEM) construction from satellite imagery allows high resolution topographic mapping. Nevertheless, errors can significantly affect topographic data acquired at an altitude of 800 km. Here, a correction method based on ground control points (GCP) is proposed. The method comprises: 1) the application of a rigid shift which minimizes misfit to the data in a least squares sense, and 2) the application of an elastic deformation so that every GCP is moved to a position of zero error. Between the measured points, the displacement is calculated using interpolation techniques. The proposed method is applied to real data from a stereoscopic DEM corrected using 28 ground control points.

INTRODUCCIÓN

Un Modelo Digital de Elevación (MDE) consiste en una grilla georreferenciada donde a cada celda le corresponde un valor de cota. De esta manera, mientras más densa es esta grilla, mejor es la representación de la superficie terrestre.

Las diferentes técnicas utilizadas para construir un MDE pueden ser clasificadas desde el punto de vista de la fuente original de los datos de cota. Así es que existen técnicas basadas en la adquisición de imágenes satelitales tomadas de manera tal que permiten hacer la reconstrucción tridimensional, y existen técnicas en las que la cota se mide directamente sobre el terreno con instrumentos diseñados a tal efecto (teodolitos o gps).

Las técnicas mencionadas en primer lugar son básicamente dos: 1) Estereoscopia [1], que se realiza a partir de imágenes ópticas tomadas con distinto ángulo y emplea el mismo principio que emplea la visión estereoscópica del ser humano y 2) Interferometría [2] [3] [4], que utiliza imágenes de radar tomadas con distinto ángulo y mide las diferencias de fase para cada punto con el objeto de calcular las cotas.

Una de las principales ventajas que presentan estas técnicas es la posibilidad de trabajar con áreas extensas y obtener buenas resoluciones en el plano x-y (típicamente celdas de 20 m de lado) a costos relativamente bajos. Esto es muy difícil y muy costoso de lograr midiendo directamente en el terreno. Otra ventaja frente a la medición directa aparece cuando la zona es de difícil acceso o a causa de la topografía no resulta posible medir en determinadas posiciones.

Sin embargo, el hecho de reconstruir topografía con información obtenida desde una altitud de 800 km introduce una serie de errores que se ponen de manifiesto en el producto obtenido (el MDE). Este es un problema que puede ser minimizado utilizando algunas mediciones de campo que permitan efectuar un ajuste y corrección del modelo.[5]

En el presente trabajo se propone un método de corrección de un Modelo Digital de Elevación construido mediante la técnica denominada Estereoscopia de imágenes ópticas. Para efectuar tal corrección se utilizaron puntos medidos sobre el terreno.

MÉTODO UTILIZADO

Fundamentos

El objetivo del método es realizar la corrección de un Modelo Digital de Elevación de manera que este se ajuste a la forma real de la superficie terrestre de la mejor manera posible, en base a la información disponible. Para ello se parte de una serie de puntos medidos, que asumiremos no poseen error, y se encuentran distribuidos de forma heterogénea en el área ocupada por el MDE.

La corrección se realiza en dos etapas. La primera de ellas consiste en una traslación rígida del MDE, de manera de minimizar una función error dada. En la segunda etapa el modelo es deformado de manera que los puntos medidos se desplazan en su error remanente, evaluándose los movimientos del resto de los puntos del MDE mediante interpolación a partir de los puntos medidos.

Traslación rígida

El procedimiento adoptado para realizar la traslación rígida del MDE fue el de ajustarlo a la nube de puntos constituida por los puntos medidos. Para ello se utilizó el criterio de mínimos cuadrados, es decir, se minimizó la suma de los cuadrados de las diferencias medidas entre la cota de cada punto seguro y la cota del MDE.

Este cálculo lleva a la obtención de un desplazamiento necesario del modelo, según la ecuación 1

$$d = \frac{\sum (z_s - z_p)}{n} \quad (1)$$

en donde:

d desplazamiento
 z_s cota del MDE
 z_p cota del punto medido

La sumatoria se extiende al número de puntos medidos.

Una vez calculado el valor del desplazamiento necesario, se suma este valor a todos los pixels para desplazar el MDE.

Deformación elástica

El objetivo de esta etapa es aprovechar al máximo la información directa que se posee, esto es, los puntos medidos, y conservar la forma del terreno que está dada por el MDE.

Es posible lograr esto mediante la aplicación al MDE de una deformación "elástica". La misma consiste en desplazar el pixel correspondiente a cada punto medido para que la diferencia entre estos se anule y en las zonas intermedias calcular los desplazamientos por interpolación.

Para ello se construye una superficie gemela del MDE, donde a cada pixel correspondiente a un punto medido se le asigna el valor de error (diferencia entre la cota dada por el MDE y la cota medida) y a todos los demás pixels se les asigna el valor cero.

$$\begin{aligned} E_{i,j} &= z_p - z_s \text{ si existe } z_p \\ E_{i,j} &= 0 \text{ si no existe } z_p \end{aligned} \quad (2)$$

A partir de esta superficie, si i,j no es un punto fijo cada pixel se calcula según la ecuación

$$E_{i,j} = \frac{E_{i,j+1} + E_{i+1,j} + E_{i,j-1} + E_{i-1,j}}{4} \quad (3)$$

Este cálculo se realiza en forma iterativa hasta que

$$\max E_{i,j}^{k+1} - E_{i,j}^k < cota \quad (4)$$

donde k es el número de iteración

La ecuación 3 es equivalente a resolver por diferencias finitas un problema de Laplace, donde la variable del problema es el error y los puntos medidos actúan como condiciones de contorno. Esta forma de interpolar resulta conveniente ya que lo que se obtiene es una función de interpolación suave que evalúa el error en cada punto en base a su distancia al punto medido.

Como resultado se obtiene una superficie de error suave que asigna un desplazamiento particular a cada pixel del MDE y que es función de su distancia a un punto medido y al error encontrado en el mismo.

El paso final para obtener el MDE corregido es sumar ambas superficies.

IMPLEMENTACIÓN

El método ha sido implementado a través de algoritmos programados en Visual C++.

Traslación rígida

La etapa de traslación rígida se resuelve con los siguientes pasos

- 1) Lectura del MDE.
- 2) Lectura de los puntos medidos.
- 3) Búsqueda del pixel i,j del MDE correspondiente a un punto medido.
- 4) Cálculo de la diferencia de cotas.
- 5) Repetición de los pasos 3 y 4 hasta que se ha recorrido todos los puntos.
- 6) Cálculo del desplazamiento necesario resolviendo la ecuación 1.
- 7) Aplicación del desplazamiento.

Deformación elástica

Durante esta etapa se presentó el problema de que para lograr convergencia en todos los puntos del MDE se hacía necesario un número elevado de iteraciones. Este número asciende típicamente a 10 veces el número de pixels del lado mayor del MDE.

En este caso la aplicación se realizó sobre un MDE de 3000 líneas por 3400 columnas. De esta manera se harían necesarias aproximadamente 34000 iteraciones, sobre 10.200.000 pixels. El tiempo estimado para realizar este cálculo en una máquina con procesador pentium III y 128 Mbyte de RAM es de 60 horas.

Con el fin de disminuir la cantidad de tiempo necesaria para el cálculo, se implementó un algoritmo multigrilla. El mismo consiste en reducir al máximo la resolución de la superficie de cálculo de la función error. El criterio utilizado es que para comenzar a calcular la única restricción es que no debe haber dos puntos medidos en un mismo pixel. La Figura 1 muestra un ejemplo del cálculo con este algoritmo.

Una vez calculada la solución sobre esta grilla de pixels más grandes, se refina la misma y se vuelve a calcular hasta que exista convergencia, y así sucesivamente hasta que se realiza el cálculo sobre la grilla original.

La reducción del tiempo de cálculo tiene su origen en que la mayor parte de la solución se calcula sobre la grilla de pixels más grandes, y luego, con la densificación de grilla solamente se suavizan los bordes, requiriendo esta operación un número mucho menor de iteraciones.

Como ejemplo, si el primer cálculo se hace sobre una grilla de 100 líneas por 100 columnas, sería necesario un número de 1000 iteraciones sobre 10000 elementos, lo cual dista mucho de las 4000 iteraciones sobre 10.200.000 elementos vistas anteriormente.

El algoritmo utilizado es el siguiente:

- 1) Lectura del MDE corregido en la etapa de traslación rígida.
- 2) Lectura del listado de errores entre los puntos medidos y el MDE corregido.
- 3) Cálculo del máximo tamaño de pixel posible.
- 4) Cálculo de la solución mediante la ecuación 3 aplicada a la grilla menos densa posible.
- 5) Refinado de la grilla y recálculo de la solución sobre la nueva grilla.
- 6) Repetición del paso 5 hasta llegar a la grilla original.
- 7) Suma de la superficie obtenida al MDE para efectuar la corrección.

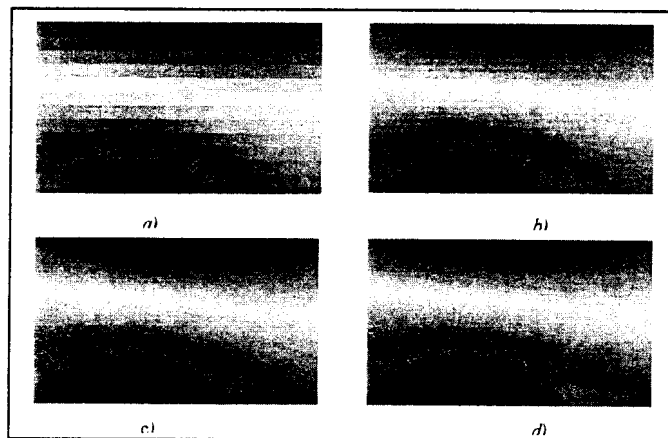


Figura 1. Cálculo de la deformación elástica con el algoritmo multigrilla. a), b), c) y d) muestran el tamaño de pixel utilizado en forma sucesiva. 160 m, 80 m, 40m y 20m respectivamente. Puede observarse cómo la forma de la solución es obtenida sobre la grilla menos densa, quedando solamente la necesidad de suavizar los bordes en cada densificación.

APLICACIÓN Y RESULTADOS

En esta sección se revisa la aplicación del método descrito a un caso real.

Se utilizó un MDE construido mediante la técnica denominada Estereoscopia a partir de un par de imágenes SPOT. El tamaño del pixel es de 20m de lado y el MDE se halla inscripto en un rectángulo de 3000 líneas por 3400 columnas.

Antes de llevar a cabo la corrección propiamente dicha se realizó la medición de una serie de puntos en el terreno con la doble finalidad de obtener los puntos medidos de referencia y de georreferenciar el MDE. Esto último para minimizar los errores debidos a desplazamiento en el plano xy.

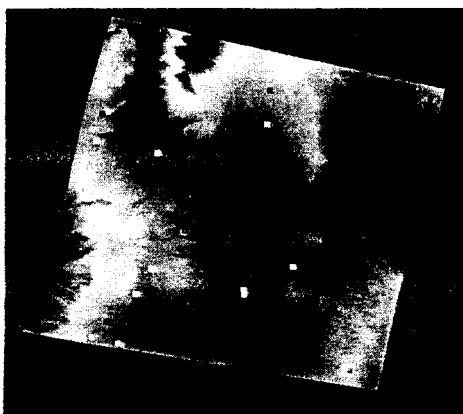


Figura 2. Distribución de los errores remanentes sobre el MDE. Los puntos negros representan los residuos con valor negativo, los blancos representan a los residuos con valor positivo.

La traslación rígida se llevó a cabo utilizando una nube de 28 puntos provenientes de las mediciones de campo. El desplazamiento necesario a aplicar fue de -48.68 metros. La figura 2 muestra la nube de puntos utilizados para efectuar la corrección sobre el MDE y en ella puede observarse la distribución de los residuos distinguiendo positivos y negativos. No se observa un patrón en dicha distribución que indique la necesidad de realizar otro tipo de movimiento rígido.

Una vez concluida la etapa de traslación rígida, se llevó a cabo el cálculo de la superficie de error necesaria para aplicar la deformación elástica. Los puntos utilizados fueron los mismos 28 puntos utilizados para calcular el ajuste por mínimos cuadrados.

La figura 3 muestra la distribución de los errores remanentes.

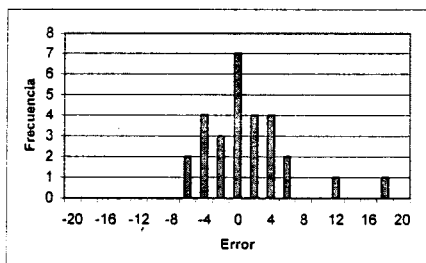


Figura 3. Distribución de errores remanentes después de la traslación rígida.

El primer paso del cálculo se realizó sobre una grilla de 375 líneas por 425 columnas y el valor de la cota de convergencia fue de 1 mm. La Tabla I muestra en detalle las características del cálculo.

Tabla I. Datos de la corrida en la etapa de deformación elástica.

Etapa	nº de filas	nº de columnas	Pixel (metros)	Iteraciones	cota
1	375	425	160	1087	1.0e-3
2	750	850	80	229	1.03-3
3	1500	1700	40	253	1.0e-3
4	3000	3400	20	216	1.0e-3

La superficie de deformación obtenida es tal como se muestra en las figuras 4 y 5.

El paso restante es sumar la superficie de deformación al modelo corregido en la etapa de traslación rígida, tal como se ve en la figura 5.

Como resultado del trabajo se ha obtenido un MDE de la zona estudiada, que presenta un perfecto ajuste a los datos que se poseen. En este sentido, es posible mejorar la solución utilizando una mayor cantidad de datos medidos.

Además se ha puesto a prueba una metodología de corrección de MDE que es aplicable a cualquier caso que presente características análogas al descrito.



Figura 4. Superficie de deformación elástica vista en perspectiva



Figura 5. Vista en perspectiva del MDE y la superficie de deformación elástica (esta última está mostrada con gran exageración vertical, siendo el pico más importante visto en primer plano de 17 metros de altura).

REFERENCIAS

- [1] Wolf, P. R., *Elements of Photogrammetry*, McGraw Hill, International Editions, 1983
- [2] Gens, R. y Van Genderen, J. L., *SAR Interferometry – Issues, Techniques, Applications*, International Journal of Remote Sensing, 17, 1996, pags. 1803-1835
- [3] Rocca, F., Prati, C., Monti Guarnieri, A., *Possibilities and Limits of SAR Interferometry*, Image Processing Techniques, European Space Agency, 1996, pags. 15-30, ISBN 92-9092-311-3
- [4] Lunetta, R. S. y Elvidge, C. D., *Remote Sensing Change Detection – Environmental Monitoring Methods and Applications*, Ann Arbor Press, 1998.
- [5] Gens R., *Quality assessment of SAR interferometric data*, Wissenschaftliche Arbeiten Der Fachrichtung Vermessungswesen Der Universität Hannover, 1998.