

SPOT 위성데이터를 이용한 수치표고모델 생성에 관한 연구

A Study on the Generation of Digital Elevation Model from SPOT Satellite Data

安 哲 浩* 安 基 元**

Ahn Chul-Ho Ahn Ki-Won

朴 炳 旭***

Park Byung-Uk

요 旨

본 연구에서는 SPOT 위성의 CCT(Computer Compatible Tape) 데이터를 이용하여 수치표고모델을 생성하는 기술을 개발함으로써, 광역에 대한 수치표고모델을 경제적이고 효율적으로 작성하는 방안을 제시하였다.

경사관측된 한 쌍의 SPOT 수치데이터를 이용하여 표고를 추출하기 위해서는 먼저 관측당시의 위성의 외부표정요소(위성의 위치 및 자세)를 결정하여야 하며, 이것을 위하여 번들조정법을 적용하였다. SPOT 데이터는 항공사진과는 달리 다중 증심투영이므로 외부표정요소에 대하여 라인의 함수형태로 모델링을 하였다.

입체 수치데이터에서 동일점을 찾기 위하여 표준상관계수매칭 기법을 적용하였으며, SPOT 위성데이터에 적합한 기준영역의 크기(매칭사이즈)를 결정하기 위한 실험 결과 13×13의 크기가 적절하였다.

동일점을 자동매칭기법으로 찾은 후, 외부표정요소를 이용한 공간교차(space intersection) 이론으로 각 점마다의 지상좌표를 결정하였다. 이와 함께 이상표고들을 소거하는 알고리즘을 개발 적용한 결과 상당히 효과적이었으며 수치표고모델의 정확도를 향상시킬 수 있었다.

ABSTRACT

This study aims to develop techniques for generating Digital Elevation Model(DEM) from SPOT Computer Compatible Tape(CCT) data, so as to present an effective way of generation of DEM for large area.

As the first phase of extracting ground heights from SPOT stereo digital data, the bundle adjustment technique was used to determine the satellite exterior orientation parameters. Because SPOT data has the characteristics of multiple perspective projection, exterior orientation parameters were modelled as a function of scan lines.

In the second phase, a normalized cross correlation matching technique was applied to search for the conjugate pixels in stereo pairs. The preliminary study showed that the matching window size of 13×13 was adequate.

After image coordinates of the conjugate pixels were determined by the matching technique, the ground coordinates of the corresponding pixels were calculated by the space intersection method. Then DEM was generated by interpolations.

In addition an algorithm for the elimination of abnormal elevation was developed and applied. The algorithm was very effective to improve the accuracy of the generated DEM.

* 서울대학교 공과대학 명예교수

** 경상대학교 공과대학 조교수

*** 서울대학교 공학연구소 특별연구원

1. 서 론

수치표고모델(Digital Elevation Model:DEM)은 표고의 공간적분포를 수치적으로 표현한 것으로서 일반적으로 2차원 평면상에서 일정한 간격으로 표고를 기록한 형태를 취하며, 그 응용분야는 원격탐사분야, 사진측량분야, 지리정보시스템, 지형의 3차원적 시뮬레이션, 국토개발, 비행체의 지형추적 항법장치 등 매우 광범위하여 수치표고모델에 대한 데이터베이스 구축요구가 급증하고 있다.

미국의 수치표고모델 제작 현황을 예로 들면, 국가기관인 USGS(United States Geological Survey)에서는 DEM이란 명칭으로 미국전역에 대한 수치표고모델(30m 간격)을 일반사용자에게 공급하고 있으며, 또한 DMA(Defense Mapping Agency)에서는 DTED(Digital Terrain Elevation Data)란 명칭으로 전세계에 대한 수치표고모델(경위도 3" 간격 및 1" 간격)을 제작하여 정부기관에만 공급하고 있다.

반면, 국내에서는 공식적으로 제작되어 공급되는 수치표고모델이 없어 일부에서 연구목적으로 수작업으로 작성하여 사용하고 있는 실정이므로 한반도 전역에 대한 수치 표고모델 제작이 시급하다.

SPOT 위성데이터를 사용하여 수치표고모델을 생성할 경우 한 scene에 포함되는 지상면적이 60km×60km(수직관측시)로써 항공사진면적의 수십배에 달하며, 주기적으로 데이터를 얻을 수 있으므로 시간적·경제적인 측면에서 획기적인 절약효과가 기대된다.^{6),12)}

따라서 본 연구에서는 SPOT 위성의 CCT(Computer Compatible Tape) 데이터를 이용하여 수치표고모델을 생성하는 기술을 개발함으로써, 광역에 대한 수치표고모델을 경제적이고 효율적으로 작성하는 방안을 제시하고자 한다.

본 연구에 사용된 데이터는 SPOT 위성으로부터 1987년 11월 29일(좌측화상, 경사각 5.5°L)과 1987년 11월 30일(우측화상, 경사각 26.2°R)에 각각 관측 수집된 path 305, row

277의 CCT 수치데이터로서, 충청남북도 일대 지역을 포함하고 있으며 기선대 고도비가 0.5인 입체데이터이다.

관측모드는 전정모드(Panchromatic mode)로서 데이터의 공간해상력은 약 10m이며 전처리수준은 지형의 표고추출에 적합한 Level 1A 데이터이다.

2. SPOT 위성의 번들조정

2.1 SPOT 위성의 번들조정 이론

본 연구의 목적인 수치표고모델의 생성을 위해서는 먼저 사용하는 SPOT scene에 대하여 데이터 취득시 위성의 위치 및 자세, 즉 외부표정요소를 결정하여야 한다. 이를 위하여 번들조정법을 적용하였다.

SPOT 위성은 각 라인마다 중심투영으로 데이터를 취득하므로 각각의 라인에 대하여 항공사진과 마찬가지로 6개의 외부표정요소($\omega_L, \phi_L, \kappa_L, X_L, Y_L, Z_L$)가 존재한다. SPOT 화상 및 지상의 좌표축을 그림 1과 같이 선택하면 i SPOT 화상에서 L라인 P화소상에 존재하는 표정점 j에 대한 공선조건식은 식(1)로 표현된다.

$$\begin{bmatrix} x \\ 0 \\ -f \end{bmatrix}_{ij} = S R_L \begin{bmatrix} X - X_L \\ Y - Y_L \\ Z - Z_L \end{bmatrix}_{ij} \quad (1)$$

여기서, x : 표정점 j의 x축 화상좌표

f : SPOT 위성의 초점거리(화소단위)

S : 축척 계수

X, Y, Z : 표정점 j의 지상좌표

$\omega_L, \phi_L, \kappa_L, X_L, Y_L, Z_L$: L라인에서의 외부표정요소

$R_L = R_{\kappa_L} R_{\phi_L} R_{\omega_L}$: L라인에서의 회전행렬

$$= \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
&= -\cos\phi_L \cos\kappa_L \quad \cos\omega_L \sin\kappa_L \quad \sin\omega_L \sin\kappa_L - \\
&\quad + \sin\omega_L \sin\phi_L - \cos\omega_L \sin\phi_L - \\
&\quad \quad \quad \cos\kappa_L \quad \cos\kappa_L \\
&-\cos\phi_L \quad \cos\omega_L \cos\kappa_L \quad \sin\omega_L \cos\kappa_L \\
&\quad \quad \quad \sin\kappa_L \quad -\sin\omega_L \sin\phi_L + \cos\omega_L \sin\phi_L - \\
&\quad \quad \quad \sin\kappa_L \quad \sin\kappa_L \\
&-\sin\phi_L \quad -\sin\omega_L \cos\phi_L \quad \cos\omega_L \cos\phi_L -
\end{aligned}$$

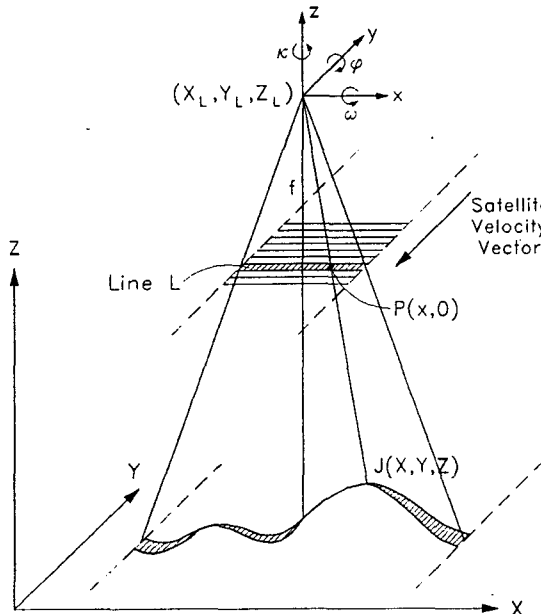


그림 1 화상 및 지상좌표계

SPOT 위성의 하나의 scene 은 6,000 개의 라인으로 구성되어 있으므로 한 scene 에 대하여 총 36,000 개의 외부표정요소가 존재하게 되는데, 이를 전부 직접 구할 수는 없다. 한편 SPOT 위성의 자세 안정성과 빠른 관측시간을 고려하면 외부표정요소들은 시간 또는 라인의 함수형태로 단순화하여 모델링을 할 수 있다.^{3),4)}

본 연구에서는 다음의 4 가지 경우에 대한 검증을 통하여 최적다항식을 결정하고자 한다.

- 경우 1) 위성의 자세 : 1 차, 위성의 위치 : 1 차 ⇒ 미지수 : 12
- 경우 2) 위성의 자세 : 2 차, 위성의 위치 : 1 차 ⇒ 미지수 : 15
- 경우 3) 위성의 자세 : 2 차, 위성의 위치 : 2 차 ⇒ 미지수 : 18
- 경우 4) 위성의 자세 : 3 차, 위성의 위치 : 2 차 ⇒ 미지수 : 21

식(1)을 다음과 같이 F_x, F_y 로 변형한 후,

$$\begin{aligned}
F_x &= x + f \frac{m_{11}(X-X_L) + m_{12}(Y-Y_L) + m_{13}(Z-Z_L)}{m_{31}(X-X_L) + m_{32}(Y-Y_L) + m_{33}(Z-Z_L)} = 0 \\
F_y &= 0 + f \frac{m_{21}(X-X_L) + m_{22}(Y-Y_L) + m_{23}(Z-Z_L)}{m_{31}(X-X_L) + m_{32}(Y-Y_L) + m_{33}(Z-Z_L)} = 0
\end{aligned} \quad (2)$$

식(2)를 Newton 의 1 차 근사식으로 선형화하면 다음과 같은 화상좌표의 관측 방정식이 얻어진다.¹⁾

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} V_x \\ V_y \end{bmatrix}_{ij} + \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \cdots b_{13}L^3 \\ b_{21} & b_{22} \cdots b_{23}L^3 \end{bmatrix}_{ij} \begin{bmatrix} \Delta\omega_0 \\ \Delta\phi_0 \\ \vdots \\ \Delta\kappa_{3-i} \end{bmatrix} \\
+ \begin{bmatrix} -b_{14} & -b_{16} \\ -b_{24} & -b_{26} \end{bmatrix}_{ij} \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix}_j = \begin{bmatrix} -F_x^0 \\ -F_y^0 \end{bmatrix}_{ij} \quad (3)
\end{aligned}$$

여기서 V_x, V_y 는 화상좌표 관측시의 잔차이고 Δ 항들은 각각의 근사값에 대한 보정량이며, F_x^0, F_y^0 는 식(2)에 각 근사값들을 대입한 값이다. 또한 계수 $b_{11} \sim b_{26}$ 은 식(2)를 각각의 외부표정요소 및 지상기준점 좌표로 편미분하여 근사값들을 대입한 값이다.

식(3)을 n 개의 표정점이 m 개의 SPOT 화상에서 관측된 경우에 대해 간단히 표현하면 다음과 같은 화상좌표에 대한 관측방정식이 성립된다.

$$\begin{aligned}
V + B' \cdot \Delta' + B'' \\
(2mn, 1) \quad (2mn, 21m) \quad (21m, 1) \quad (2mn, 3n) \\
\cdot \Delta'' = \epsilon \\
(3n, 1) \quad (2mn, 1) \quad (4)
\end{aligned}$$

식(4)의 해를 구하기 위하여 이를 외부표정요소와 지상좌표에 대한 관측방정식으로 분할한 후 조합한 전체 관측방정식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} V \\ V' \\ V'' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B' & B'' \\ -I & 0 \\ 0 & -I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta' \\ \Delta'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \epsilon \\ C' \\ C'' \end{bmatrix} \quad (5)$$

식(5)에 최소제곱법을 적용하면 Δ', Δ'' 를 구할 수 있다.

구해진 Δ', Δ'' 항들은 공선조건식을 선형화하

면서, 참값에 근접하기 위한 보정량들이므로 일련의 계산이 끝나면 근사값에 보정량을 더하여 반복계산을 해야 한다.

2.2 외부표정요소의 결정

2.2.1 외부표정요소의 초기값 결정

SPOT 위성의 CCT 보조데이터에는 scene의 중심라인을 관측할 당시 위성의 개략적인 경도, 위도, 고도가 주어지며 이를 이용하면 외부표정요소 중 위성의 위치에 관한 초기값을 유추할 수 있다.

한편, SPOT 위성의 좌표계는 GRS80(Geodetic Reference System 1980)좌표계를 채택하고 있으며,²⁾ 본 연구에서 사용되는 좌표계는 Bessel 타원체를 기준으로 하여 횡메르카토르(TM: Transverse Mercator) 투영법으로 투영한 평면직각좌표계이므로 좌표계간의 변환이 필요하다. 이러한 좌표계 간의 변환은 GRS80 측지좌표계에서 국내 측지 좌표계로의 변환과 국내 측지좌표계에서 평면직각좌표계로의 변환으로 이루어진다.¹³⁾

SPOT 위성의 외부표정요소 초기값 중 $X_0, Y_0, Z_0, X_1, Y_1, Z_1$ 은 다음과 같이 구하였다. 먼저 CCT의 보조데이터 중에서 위치 추산력 데이터(9점)를 이용하여 라인의 증가에 따르는 위치 변화량을 추산하여 X_1, Y_1, Z_1 의 초기값으로 활용하였다.

X_0, Y_0, Z_0 의 초기값은 화상의 마지막 라인을 관측할 당시의 위성 좌표값으로 설정하였으며 이것은 좌표변환의 결과값과 X_1, Y_1, Z_1 값을 이용하여 계산하였다. X_0 값에서는 입사각의 영향을 추가로 고려하였다.

그리고 ω_0 의 초기값으로는 0° 를 설정하였으며, ϕ_0 의 초기값으로는 CCT에 기록되어 있는 입사각을 이용하였고, κ_0 는 화상표정(γ)값을 사용하였다. 나머지 외부표정요소들의 초기값은 0으로 설정하였다.

2.2.2 외부표정요소의 결정 및 평가

사용데이터의 외부표정요소를 결정하기 위하여 22개의 기준점과 23개의 검사점 등 총 45개의 관측점에 대하여 화상좌표와 지상좌표를

관측하였으며, 관측점들은 좌우화상 모두에 공통으로 존재하면서 평면적 위치 및 높이가 고른 분포를 이루도록 선정 하였다.

화상좌표의 관측은 화면상에서 ERDAS 소프트웨어를 이용하여, 관측하고자 하는 화소 근처를 cubic convolution 기법으로 확대시킨 후 정확한 위치를 화소이하의 단위까지 정밀하게 측정하였다. 지상좌표는 국립지리원에서 발행한 1:25,000 지형도(32장)에서 디지털타이저로 관측하였다.

22개의 기준점에 대하여 관측된 화상좌표 및 지상좌표를 사용하여, SPOT 위성의 외부표정요소를 결정하기 위한 번들조정 프로그램을 실행하였다. 본 연구에서는 사용데이터에 적합한 외부표정요소의 최적다항식을 결정하기 위하여 앞에서 언급한 바와 같은 4가지 경우에 대하여 비교분석하였다.

구하여진 외부표정요소 다항식의 타당성을 평가하기 위하여 23개의 검사점에 대하여 공간교차이론을 적용하여 지상좌표를 계산한 후, 관측값과의 잔차로부터 X, Y, Z의 평균제곱근오차(RMSE)를 구하였으며 그 결과는 표 1과 같다.

표 1 각 경우에 따른 검사점의 평균제곱근오차 (단위: m)

항 목	경우 1	경우 2	경우 3	경우 4
RMSE(X)	11.822	11.545	11.324	11.135
RMSE(Y)	9.571	10.126	10.289	9.839
RMSE(Z)	14.425	14.254	13.469	14.422
반복계산수	5 회	4 회	10 회	8 회

표 1에 나타난 검사점의 정확도를 보면 평면적 오차는 약 11m, 높이 오차는 약 14m로서 다항식의 차수에 별로 관계없음을 알 수 있다. 그리고 높이의 오차가 평면적 오차보다 크게 나타난 원인은 지구의 곡률에 의한 영향인 것으로 판단된다.

또한 본 연구에서는 시간관계상 관측점들의 지상좌표를 1:25,000의 중측척 지형도에서 관측하였는데, 여기에는 관측값 자체에 지형도의 신축 및 디지털타이저의 오차의 영향이 상대적으로 많이 내포되어 있다고 할 수 있다. 그러므로

지상좌표의 값을 1:5,000의 대축척 지형도에 서 읽거나 실제 기준점 측량을 통하여 관측하면 더욱 좋은 결과를 얻을 수 있을 것이다.

이상과 같은 번들조정의 결과로부터, 본 연구에서는 SPOT 위성의 외부표정요소 다항식으로 경우 2(위성의 자세: 2차, 위성의 위치: 1차)를 선정하였다. 이것은 추후 좌표계산 과정에서의 계산량을 가급적 줄이기 위함이며, 또한 경우 2가 수렴속도가 4회로써 가장 안정적이었기 때문이다.

3. 수치표고모델의 생성

본 연구에서의 수치표고모델을 생성하는 전반적인 흐름은 그림 2와 같다.

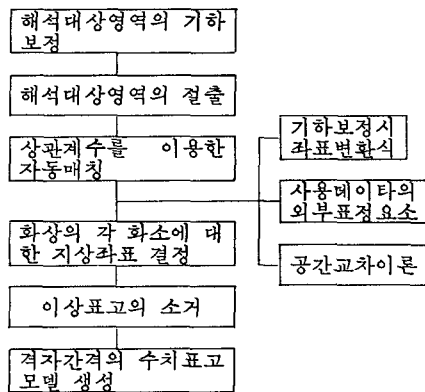


그림 2 수치표고모델 생성 흐름도

3.1 자동매칭기법의 적용

수치표고모델을 생성하기 위해서는 화상의 각

화소에 대한 지상좌표 X, Y, Z를 알아야 하며, 이를 위하여 먼저 한쌍의 입체모델 상에서 동일한 점을 찾는 자동매칭이 선행되어야 한다.^{9),10)} 본 연구에서는 수치표고모델 작성에 일반적으로 많이 사용되는 표준상관계수매칭(normalized cross correlation matching)을 적용하였다.

이 방법은 그림 3에서 보는 바와 같이 좌측 화상의 화소에 대하여 크기 $M_1 \times N_1$ 의 기준영역(window area)을 설정하고 우측화상에 대하여는 기준영역이 존재할 가능성이 있는 크기 $M_2 \times N_2$ 의 검색영역(search area)을 설정하여, 기준영역을 검색영역 내에서 한 화소씩 움직여 가며 상관계수 $r(n, m)$ 을 계산한다.^{7),11)}

즉 기준영역이 검색영역내 어디에서 가장 잘 부합하는지를 결정하기 위하여 n 을 1에서 $(N_2 - N_1 + 1)$ 까지, m 을 1에서 $(M_2 - M_1 + 1)$ 까지 움직이면서 상관계수 $r(n, m)$ 을 계산한 후 r 값이 가장 클 때의 위치를 결정하는 방법이다.

해석대상영역으로서 대전직할시 서구 형제산 부근(충남 논산군과 금산군과의 경계)의 $4\text{ km} \times 4\text{ km}$ 지역을 선정하였으며, 화소간의 거리가 10 m가 되도록 기하보정을 실시한 후 해석대상영역의 화상을 441×461 크기로 절출하여 이 화상에 대해 자동매칭기법을 적용하였다.

매칭에서 기준영역의 크기(매칭사이즈)를 결정하기 위하여 좌측화상에서 50화소 간격으로 규칙적인 검사점(56점)을 선정하였으며, 이 점들에 대하여 기준영역 크기별로 최대상관계수를 구하여 평가하므로써 적절한 크기를 결정하였

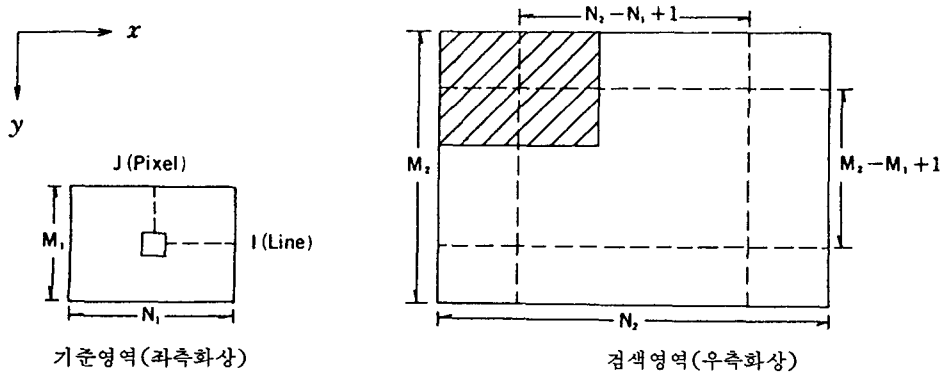


그림 3 표준상관계수매칭의 원리

다.

본 연구에서는 기준영역의 크기를 5×5 화소에서 31×31 화소까지 모두 14 가지를 비교하였으며 그 결과는 표 2와 같다.

표 2 기준영역 크기별 검사점들의 최대상관계수 평균값

기준영역 크기	5×5	7×7	9×9	11×11	13×13
상관계수 평균	0.8297	0.8392	0.8507	0.8662	0.8708
기준영역 크기	15×15	17×17	19×19	21×21	23×23
상관계수 평균	0.8691	0.8670	0.8673	0.8635	0.8599
기준영역 크기	25×25	27×27	29×29	31×31	
상관계수 평균	0.8581	0.8579	0.8573	0.8562	

본 연구에서는 기준영역의 크기를 13×13으로 결정하였으며, 계산된 최대상관계수값이 임계치보다 작을 경우(매칭의 오류를 범할 확률이 높은 지역)에는 기준영역의 크기를 2배 증가시켜 재계산 하므로써 이상표고의 발생 확률을 줄

이고자 하였다.

한편, 앞서 결정된 외부표정요소에 대한 평가에서 검사점들에 대한 수평위치의 평균계급근오차가 약 10m이었기 때문에 모든 화소에 대하여 매칭하는 것은 부적절하다고 판단되므로, 2화소(약 20m 간격) 마다의 매칭을 실시하였다.

3.2 지상좌표 계산

지상좌표 계산은 공간교차(space intersection) 이론에 의하여 구하였다. 즉, 그림 4에서 보면 자동매칭으로 동일점 p_1, p_2 를 찾았을 경우 그때의 투영중심 L_1, L_2 에 의하여 두개의 직선이 형성된다. 이론적으로는 두 직선이 한 점에서 만나야 하지만, 일반적으로 외부표정요소 계산 시나 매칭위치 계산에서 피할 수 없는 오차들로 인하여 두 직선은 서로 교차하지 않는다.⁸⁾

따라서 실제에 있어서는 두 직선의 최단 거리인 벡터 \vec{d} 를 찾아 이것의 중간점을 교차점으로 간주하여 지상좌표를 계산한다.

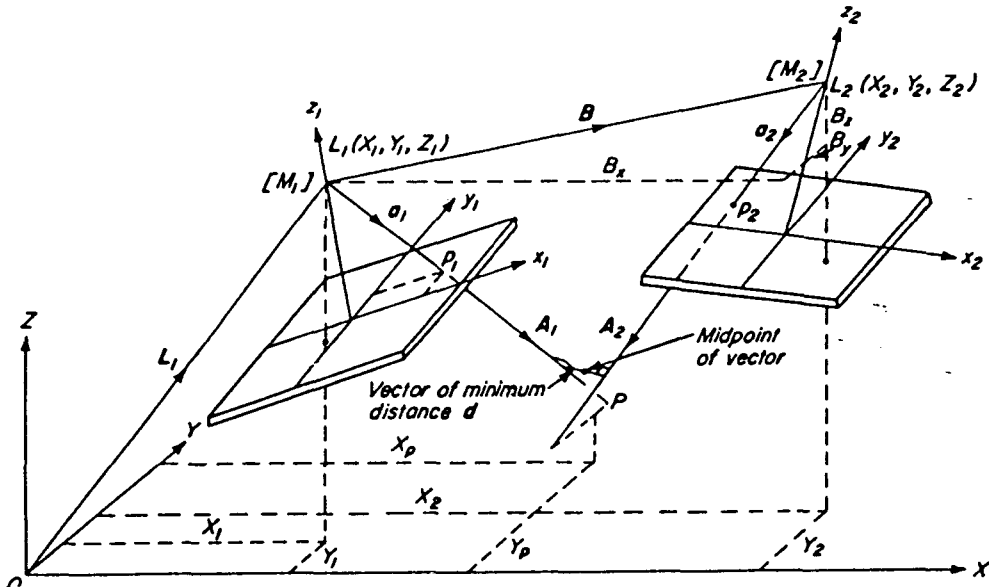


그림 4 공간교차 개념도

\vec{d} 는 두 직선에 수직인 벡터이므로 \vec{a}_1 과 \vec{a}_2 의 외적으로 표현된다.

$$\vec{d} = \vec{a}_1 \times \vec{a}_2 \quad (6)$$

한편 벡터의 합에 의하여 다음과 같은 관계식

이 성립한다.

$$\vec{B} = \lambda_1 \vec{a}_1 + k\vec{d} - \lambda_2 \vec{a}_2 \quad (7)$$

따라서 식(7)에 의하여 λ_1, k, λ_2 를 구할 수 있게 되며, 실제로 구하고자 하는 점 P의 지상좌

표(X_P, Y_P, Z_P)는 식(8)로 구해진다.

$$\vec{P} = \vec{L}_1 + \lambda_1 \vec{a}_1 + 1/2k\vec{d} \quad (8)$$

3.3 수치표고모델의 생성

수치적 방법에 의한 표고추출에서 매칭점을 잘못 결정하였을 경우 이상표고가 발생하게 되며, 가능한 한 표고를 추출하기 전의 매칭단계에서 소거하여야 한다.

매칭의 오류는 기준영역 내의 화소들이 동질적인 지역 또는 선형구조물이 있는 지역을 나타낼 경우에 주로 발생되므로, 기준영역 내의 분산값이나 최대상관계수값을 통하여 이상표고가 발생할 수 있음을 예측할 수 있으며, 이와 같을 때는 기준영역의 크기를 증가시키므로써 이상표고의 발생빈도를 줄일 수 있다.

따라서 본 연구에서는 최대상관계수값을 조사하여 임계치보다 작을 경우 기준영역의 크기를 2배 확대시킨 후 최대상관계수값을 재계산하였으며 임계치로는 0.6을 채택하였다.

기준영역의 크기를 확대한 후의 최대상관계수값도 임계치보다 작을 경우에는 매칭점을 신뢰할 수 없기 때문에 지상좌표를 계산하지 않았으며 수치표고모델 생성시에 보간되도록 하였다.

표고(지상좌표)가 계산된 경우에도 여전히 이상표고가 존재할 수 있으며 이러한 표고들은 표고의 보간 과정에서 악영향을 미치게 되므로 이것을 제거하여야 한다. 이것은 그 지역의 허용경사도 개념으로 검사할 수 있으며, 이를 위하여 인접 화소 사이의 표고차가 일정값 이상 차가 날 경우 제거한 후 역시 수치표고모델 생성시에 보간되도록 하였다.

구하여진 각 점의 지상좌표들은 불규칙한 공간을 형성하므로 이를 효과적으로 이용하기 위해서는 일정한 격자간격 평면상의 표고 데이터로 보간하여야 하며, 이렇게 하므로써 수치표고모델이 생성된다.

본 연구에서는 구하여진 지상좌표값들로 부터 격자형의 수치표고를 구하기 위하여 DCA 소프트웨어를 이용하였다. 여기서는 불규칙 분포의 표고 데이터로 부터 먼저 불규칙 삼각망(TIN: Triangulated Irregular Network)을 형성한 후

가중평균법으로 격자점의 표고를 구한다.

격자점 간의 간격은 20 m로 선정하였으며, 구하여진 격자 표고데이터를 16 비트의 래스터(raster) 화일형태(201×201 화소)로 저장하므로써 수치표고모델을 생성하였다.

4. 수치표고모델의 평가

본 연구에서는 이상표고 소거의 효과를 검증하기 위하여, 이상표고 소거 알고리즘을 적용하여 생성한 수치표고모델(이후 목적 수치표고모델이라 표현함) 이외에, 이상 표고 소거 알고리즘을 전혀 적용하지 않은 수치표고모델(이후 단순 수치표고모델이라 표현함)을 별도로 생성하여 비교 평가하였다.

생성된 수치표고모델의 정확도에 가장 큰 영향을 미치는 것은 매칭이며, 매칭의 신뢰도를 검증하기 위하여 매칭점에서의 상관계수값을 분석한 결과, 평균값이 약 0.88 으로서 매칭 당시의 상관계수는 비교적 높은 값을 나타내고 있어 매칭을 신뢰할 수 있다고 평가된다.

생성된 수치표고모델의 정확도를 평가하기 위하여 기준 수치표고모델과 비교하였다. 기준 수치표고모델은 해석대상지역의 지형도(1:5,000 지형도 4장)에서 10 m 간격의 등고선을 AutoCAD 소프트웨어를 사용하여 디지털이징한 후 DCA 소프트웨어로 20 m 격자 간격의 표고를 추출하여 작성하였다.

그림 5~그림 7은 수치표고모델들의 시각적 비교를 위하여 DCA의 3차원 표현기능을 이용하여 각각 입체적으로 나타낸 것으로서 시점의 방향은 남서방향이며 45° 각도로 내려다 본 모습이다.

그림 6과 그림 7을 비교하여 보면 이상표고 소거 알고리즘의 적용으로 이상표고들이 거의 소거되었으며, 아직도 상존하는 경우에는 그 크기가 많이 감소되었음을 알 수 있다.

수치표고모델의 질을 평가하는 방법으로서 정확도(accuracy)와 안정도(reliability)가 있다. 정확도는 생성된 수치표고모델과 기준 수치표고모델 간의 표고차이에 대한 평균, 표준편차(σ),

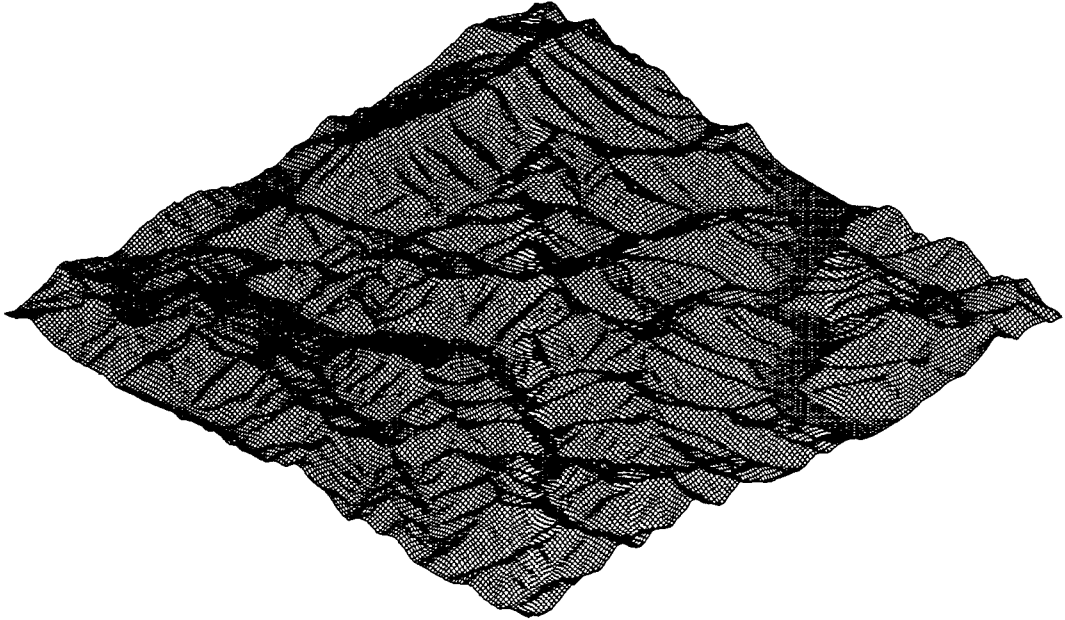


그림 5 기준 수치표고모델의 3차원적 표현

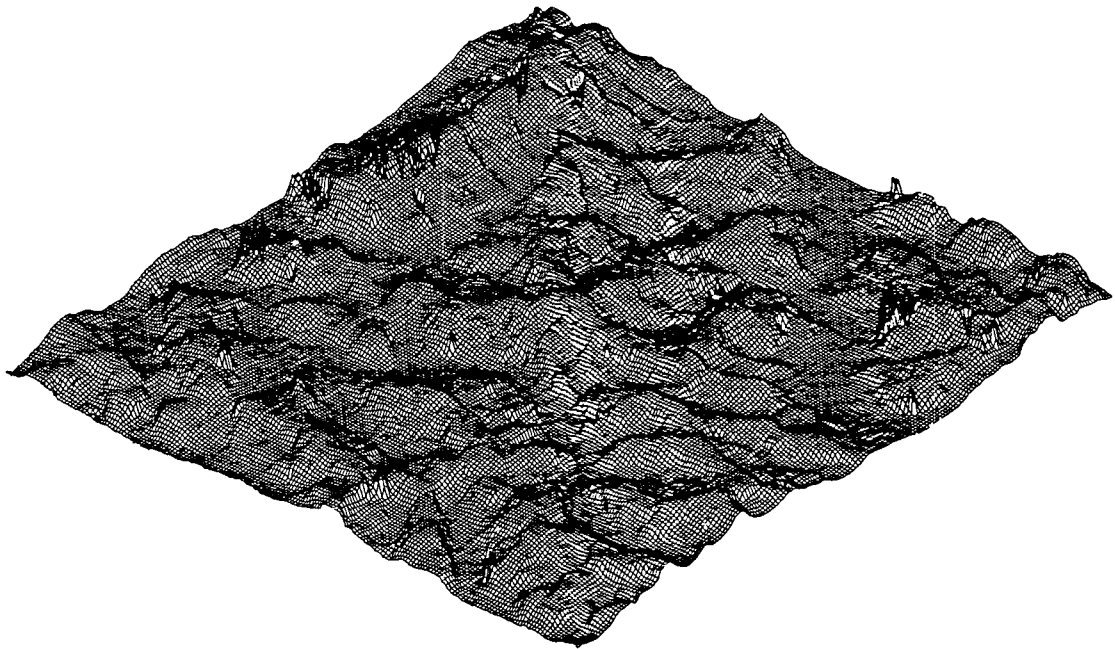


그림 6 단순 수치표고모델의 3차원적 표현

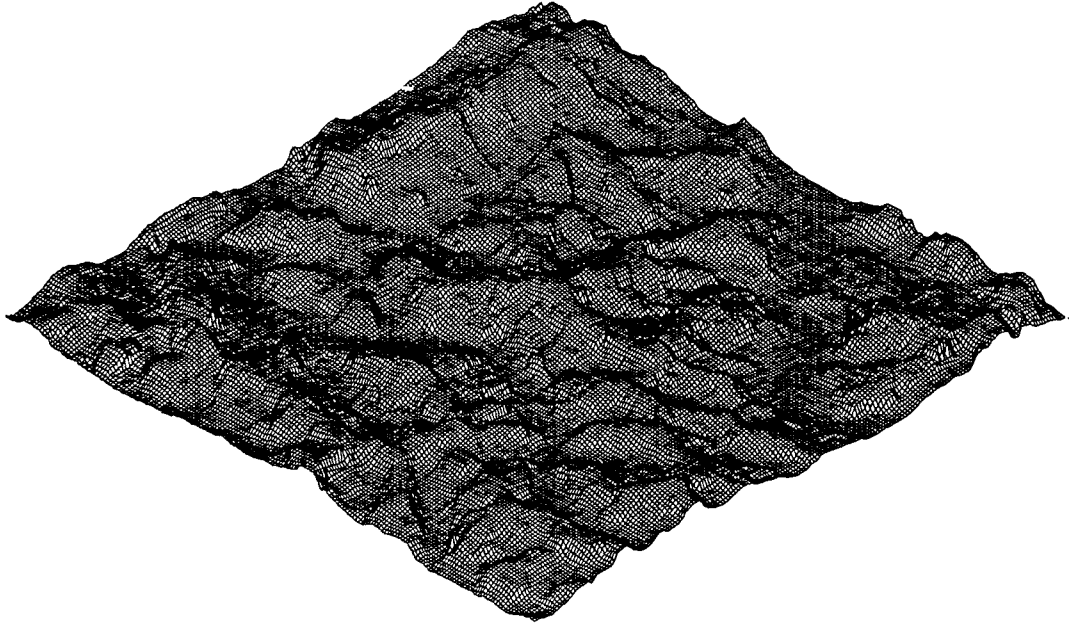


그림 7 목적 수치표고모델의 3차원적 표현

평균제곱근오차(RMSE) 등으로 평가되며, 안정도는 표고차이가 3σ 이상인 점들의 비율로서 평가된다.

본 연구에서는 해석대상영역의 모든 점에 대하여(총 40,401 점), 기준 수치표고모델에 대한 생성된 수치표고모델의 표고오차를 분석하였으며, 그 결과는 표 3과 같다.

표 3에서 보면 역시 목적 수치표고모델이 단순 수치표고모델 보다 모든 면에서 정확도의 향상이 이루어졌음을 알 수 있다.

표 3 단순 수치표고모델과 목적 수치표고모델의 표고오차

구분	단순수치표고모델	목적수치표고모델
평균값	15.69 m	15.50 m
표준편차	17.80 m	14.76 m
평균제곱근오차	23.73 m	21.41 m
최대값	291 m	155 m
최소값	-187 m	-71 m
안정도	0.86%	0.78%

표고오차의 평균값이 양수인 것은 생성된 수치표고모델의 표고가 지형도에서의 표고보다 높

다는 것을 의미한다. 이것은 지형도에서의 표고값이 지표면의 표고를 나타낸 것인 반면 매칭기법으로 구한 표고값은 지형지물의 시각적 높이(visual height)를 나타낸 것이기 때문에, 본 연구에서와 같이 산악지형의 경우에 수목의 높이에 의한 표고상승 효과가 많이 작용하였을 것으로 판단된다. 따라서 매칭기법으로 수치표고모델을 생성함에 있어서, 지상좌표 계산시 시각적 높이의 영향을 미리 고려하는 것이 바람직할 것으로 생각된다.

그리고 평균제곱근오차(21.41 m)가 번들조정시 검사점들의 높이의 평균제곱근오차(14.25 m)보다 크게 나타나고 있는데, 그 원인은 매칭점들의 상대적 명확성 감소, 수평위치 오차의 영향, 수목에 의한 표고상승 영향 등으로 생각할 수 있다.

표고오차의 최대값 및 최소값은 155 m 와 -71 m 로 크게 나타나고 있지만 표고오차가 상대적으로 큰 점들은 극소수에 불과하다. 이것은 표고오차가 3σ 이상인 점들의 비율이 0.78%로써 매우 안정적인 것에서도 확인되고 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 입체모형을 형성하는 한 쌍의 SPOT CCT 데이터를 사용하여 수치표고모형을 생성하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) SPOT 위성의 수치데이터를 이용하여 수치표고 모형을 생성하는 구체적인 기술을 개발하므로써, 한반도 전역과 같은 광범위한 지역에 대한 수치표고모형의 생성을 위한 경제적이고 효율적인 방안을 제시하였다.
- 2) 외부표정요소의 최적다항식을 결정하기 위하여 위성의 자세에 대하여 1차에서 3차까지, 위성의 위치에 대해서는 1차에서 2차까지 적용하여 정확도를 검증한 결과, 다항식의 차수에 별로 관계없이 일정함을 알 수 있었다.
- 3) SPOT 위성데이터에 적합한 기준영역의 크기(매칭사이즈)를 결정하기 위하여 5×5에서 31×31까지 총 14가지를 비교한 결과 13×13의 크기가 적절하였다.
- 4) 수치표고모형의 생성에 있어서 이상표고를 소거하는 알고리즘을 개발 적용하므로써 정확도를 향상시킬 수 있었다. 생성된 수치표고모형은 실제 지형보다 약간 평활화(smoothing) 되기는 하였지만 지형의 기록 상태를 전반적으로 잘 표현하고 있으며 표고 오차의 분포도 안정적이어서, 매칭기법을 이용한 자동 표고 추출이 타당함을 알 수 있었다.

아울러 본 연구결과를 실용화를 위하여 향후 수치표고모형의 정확도를 향상시키기 위한 연구가 지속되어야 할 것이며, 또한 전체 SPOT scene에 적용하기 위해 컴퓨터 처리시간을 줄이기 위한 연구가 계속되어야 할 것이다.

참고문헌

1. American Society of Photogrammetry, 1980, Manual of Photogrammetry, 4th ed., pp.77-100.
2. CNES and SPOT IMAGE, 1988, SPOT User's Handbook, Vol. 1 : Reference Manual.
3. Chen, L.-C., L.-H. Lee, and S.-C. Lee, 1988, "DTM Generation Using SPOT Digital Data", IAPRS, Vol. 27, Part B3, pp.100-109.
4. Deren, L. and C. Jiayu, 1988, "Bundle Adjustment of SPOT Imagery", IAPRS, Vol. 27, Part B3, pp. 449-455.
5. Fukushima, Y., 1988, "Generation of DTM Using SPOT Image Near Mt. Fuji by Digital Image Correlation", IAPRS, Vol. 27, Part B3, pp. 225-234.
6. Gagan, D.J. and I.J. Dowman, 1988, "Topographic Mapping from SPOT Imagery", P.E. & R.S., Vol. 54, No. 10, pp. 1409-1414.
7. Lemmens, M. J. P. M., 1988, "A Survey on Stereo Matching Techniques", IAPRS, Vol. 27, Part B8, pp. V-11~V-23.
8. Moffitt, F.H. and E.M. Mikhail, 1980, Photogrammetry, 3rd ed., Harper & Row, pp. 443-446.
9. Trinder, J.C., B.E. Donnelly, and K. Becek, 1991, "Mapping from SPOT Analogue and Digital Images", 1991 ACSM-ASPRS Annual Convention, Vol. 3, pp. 361-371.
10. Yan, L, and K. Novak, 1991, "Simultaneous Extraction of Digital Elevation Models and Orthophotos", 1991 ACSM-ASPRS Annual Convention, Vol. 3, pp. 412-418.
11. 안기원, 1988, 인공위성 화상데이터를 이용한 지형표고의 추출, 서울대학교 대학원, 박사학위논문
12. 안철호, 1983, "Remote Sensing Data의 처리와 해석", 한국측지학회지, 제 1권, 제 2호, pp. 1-15.
13. 안철호, 최제화, 1986, 일반측량학, 문운당, pp. 39-52.
14. 조기성, 1991, SPOT 위성영상의 외부표정요소 결정에 관한 연구, 연세대학교 대학원, 박사학위논문