

SPOT 3중 입체위성영상을 이용한 수치표고모형의 정확도 개선

A Study on the Improvements of Positioning Accuracy of
Digital Elevation Model Using SPOT Satellite Triplet Images

조 봉 환*
Cho, Bong-Whan

이 용 웅*
Lee, Yong-Woong

신 대 식**
Shin, Dae-Shik

要 旨

위성영상을 이용한 대부분의 연구는 대상지역에 대한 2장의 스테레오영상(stereo-pair)을 입체적으로 해석하여 3차원 위치를 결정하거나 영상 상관 기법을 적용한 입체매칭을 통하여 수치지형표고를 추출하였다. 그러나 스테레오 영상을 이용하여 위성의 위치 및 자세를 모델링하거나 위치정보를 얻고자 할 경우에는 기준점의 미세한 오차량에도 크게 영향을 받기 때문에 그 결과에 대한 안정성을 기대하기가 어려웠다. 또한 두 화상중 하나의 화상에 노이즈(noise), 그림자, 또는 구름이 존재할 때 그 지역에 대한 수치지형모델의 생성이 불가능하거나 정확도가 저하되는 것이 문제로 지적되어 왔다. 이러한 경우에 다중의 입체영상을 분석하므로써 문제점을 해결할 수 있으며 본 연구에서는 동일지역에 대한 3장의 SPOT 위성영상을 입체적으로 해석하여 수치지형 표고모델의 정확도를 개선하였다.

ABSTRACT

Most studies using satellite images have been performed to determine three dimensional positioning by stereoscopic analysis for stereo-pair or to extract digital elevation model by stereo matching using image correlation techniques. Because the small errors on the ground control points have a great impact on the results, however, it is hard to get reliable products when we analyze satellite orbital parameters or acquire digital elevation model by using only stereo-pair. Also, if there are noises, shadows, or clouds on the one of stereo pair, it is difficult to produce DEM(digital elevation model) on the area under analysis or to have good accuracy. In these case, it can be solved by systematic analysis of the multiple stereo images. This paper suggests the improvements on the accuracy of the digital elevation model by the developments of stereoscopic analysis techniques for the triplet of SPOT satellite images on the same area.

1. 서 론

수치지형모델(DTM : Digital Terrain Model)이란 지형특성의 공간적 분포를 수치적으로 표현한 것으로

여러 가지 지형특성중에서 표고를 지형의 특성으로 이용하는 경우를 특별히 수치지형표고모델(DEM : Digital Elevation Model)이라 한다. 수치지형표고모델은 정사투영사진을 제작하거나 지형의 분석결과를 등

* 정회원, 국방과학연구소 선임연구원

** 정회원, 국방과학연구소 연구원

고선도, 경사도, 지형기복고선도, 경사도, 지형기복도 등에 의해 3차원으로 표현하는데 이용되고 있다.

미국의 경우, 국가 기관인 지질조사국(USGS : United States Geological Survey)에서 DEM이란 명칭으로 미국전역에 대한 30m 간격의 수치표고모델을 공급하고 있으며, 국방성 지도국(DMA : Defense Mapping Agency)에서는 DTED(Digital Terrain Elevation Data)란 명칭으로 관심지역에 대한 1" × 1" 또는 3" × 3" 간격의 수치표고모델을 제작하여 관련기관에만 공급하고 있다.¹⁾ 국내에서는 수치표고모델이 필요한 경우에 등고선도로부터 표고를 독취하거나 항공사진을 촬영하여 해석도화기에 의한 작업에 의존하고 있는 실정이므로 작업범위가 넓은 경우에는 정확도나 비용 면에서 매우 비효율적이다. 따라서 광역의 위성데이터로부터 수치적 처리에 의한 정확한 수치지형표고모델의 자동생성기술의 실용개발이 요청되고 있다.

본 연구에 사용된 SPOT 위성데이터는 1987년 11월 29일, 1987년 11월 30일, 1990년 11월 27일에 각각 관측된 것으로서 충청남북도의 일부지역(60km×60km)을 포함하고 있다. 관측모드는 전정모드(panchromatic mode)로서 데이터의 공간해상력은 약 10m이며 전처리수준은 지형의 표고추출에 적합한 Level 1A이다. SPOT 위성영상을 이용하여 입체쌍 구성형태에 따른 기하학적 모델링 수행 및 수치지형표고모델을 생성하였으며, 3중 입체영상을 이용한 기하학적 모델링을 시도하였다. SPOT 위성의 기하학적 모델링을 위해 대상지역의 화상에서 46개의 점을 이용하였으며, 이 중 11점은 기준점으로 나머지 35점은 검사점으로 활용하였다. 입체쌍별로 전체 화상에 대하여 3차원 모델링한 후, 1:50,000 기본지도의 <대전>도엽에 해당되는 약 28km×28km 지역을 해석대상영역으로 선정하여 영상매칭기법을 통한 25m 간격의 수치표고모델을 생성하였다. 위성영상으로부터 제작된 수치표고모델, 기본지도 및 미국 국방성 지도국에서 제작된 수치표고모델을 항공사진으로부터 제작된 수치표고모델과 비교해 봄으로써 SPOT 위성영상 데이터로부터 생성된 수치표고모델의 이용 타당성을 분석하였다.

2. SPOT 위성영상의 3차원 위치결정 이론

2.1 관측방정식과 외부 표정요소

SPOT 위성영상의 경우에는 6000개 라인 각각에 대하여 별도의 중심투영방식을 취하는 pushbroom 탐측 원리를 이용하므로 각 라인별로 외부표정요소를 결정해야 한다. 본 연구에서는 SPOT 위성영상의 모델링을 위해 항공사진에서 이용하는 모델링방법을 수정하여 이용하였다.

SPOT 위성영상은 panchromatic mode인 경우에 각 라인에 대한 공선조건식을 고려할 경우 총 36,000개의 외부 표정요소가 존재하게되며 이는 현실적으로 모델링이 불가능하므로 본 연구에서는 모델링 안정성을 고려하여 외부표정요소 각각에 대하여 탐측시간(t)의 함수로 된 2차 다항식으로 구성하였으며 첫번째 라인 직전의 탐측시각을 t=0으로 정의하였다. 이와 같이하여 결정해야할 외부 표정요소를 총 18개로 줄일 수 있으며 각 점에 대한 상좌표 관측방정식으로부터 임의 갯수의 점에 대한 상좌표 관측 방정식을 구성하여 이로부터 구하고자하는 외부표정요소의 보정량을 직접 계산할 수 있다. 이 계산된 외부표정요소의 보정량을 이용하여 지상기준점좌표의 보정량을 계산할 수 있다. 이와 같은 방법으로 계산한 외부표정요소 및 지상기준점좌표의 보정량은 공선조건식을 선형화하여 계산된 근사값을 참값에 접근시키기 위한 보정치로서 이전의 근사값에 더하여 새로운 근사값을 설정(근사값(n+1) = 근사값(n) + 보정량(n))한 후 반복수행한다. 매번의 반복수행을 통해 계산되는 보정량과 이전의 보정량간의 차이가 요구정확도보다 작을 때까지 반복한다. 본 연구에서는 요구정확도를 10^{-2} 로 정하였다.

2.2 외부표정요소의 초기치 추정

외부표정요소의 초기치 추정은 크게 위성의 노출 중심위치에 대한 추정과 센서 자세에 대한 추정으로

나눌 수 있으며 위성의 노출중심위치에 대한 추정방법은 위성이 지상을 관측하는 동안 몇 점의 노출순간 위치 (x_i, y_i, z_i) 및 시각 (t_i) 가 측정되었다고 할 경우에 (t_i, x_i, y_i, z_i) 형태의 데이터를 구성할 수 있다. 2.1에서 가정한 2차 다항식의 초기계수, 즉 외부표정요소의 초기치를 결정하기 위하여 $n (\geq 4)$ 개의 데이터를 관측하였다고 가정할 경우 (t_i, x_i) 만을 고려한 근사식에 대하여 잔차의 제곱합을 S 라 하고 S 를 최소로 하기 위한 편미분 계수를 0으로 하여 풀면 외부표정요소의 초기치 (X_0, X_1, X_2) 를 결정할 수 있게 된다.

또한 $(t_i, y_i), (t_i, z_i)$ 의 경우도 이와 동일한 방법으로 계산할 수 있으며 위성이 지상을 관측하는 동안 시각 t_i 에서 지상좌표축에 대한 센서의 자세 $(\omega_i, \varphi_i, \kappa_i)$ 가 계산된 경우에는 센서의 자세에 대한 초기치도 위성 노출중심위치의 경우와 마찬가지로 추정할 수 있다.

표 3.1 연구대상 위성영상 특성

위성영상	G R S	전처리수준	경사각	촬영일자
좌측	K305J277	1 A	L23.4°	1990/11/27
중앙	#	#	L05.6°	1987/11/29
우측	#	#	R26.2°	1987/11/30

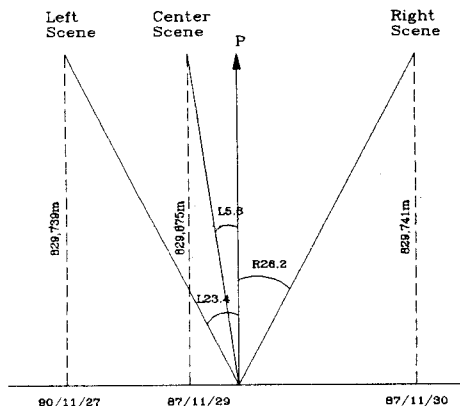


그림 3.1 SPOT 위성영상의 기하학적인 관계

3. 3차원 모델링

3.1 영상특성분석

본 연구에서는 위성영상의 외부표정요소를 계산하기 위해 3장의 SPOT level 1A panchromatic GRS 305-277 위성수치영상과 동일지역의 위성사진 및 축척 1:50,000 기본지도를 이용하였다. 위성영상의 지상영역은 충남북 일부지역으로서 약 60km×60km이다. 연구대상지역은 위성영상 영역내부로서 1:50,000 기본지도 <대전도엽> 영역과 일치하는 약 28km×28km이다. 그림 3.1은 실험에 이용된 SPOT 위성영상간의 기하학적인 관계를 나타내고 있다.

3.2 지상기준점 선정

본 실험에서는 지상기준점 11점, 검사점 35점을 이용하였다. 지상기준점의 지상좌표는 이전에 측정된 30점의 1등 정밀삼각측량 성과중에서 실험에 사용한 3장의 위성영상 영역에 공통적으로 존재하는 11점의 값을 선택하였다.

그림 3.2에서 보는 바와같이, 기준점은 영상의 중첩영역 전체에 고르게 분포하도록 선정하였으며 검사점은 실험대상지역 내부에 분포하도록 하였다. 지상좌표계로 이용된 국소직각좌표계의 원점은 WGS84 타원체상의 값으로 기록된 중앙영상의 지상영역 중앙위치(CO)를 축지계변환을 수행하여 Bessel 타원체상의 값으로 바꾸어 이용하였다.

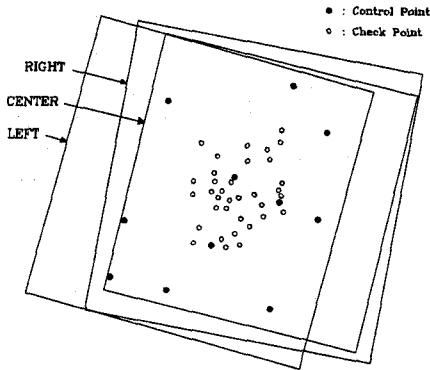


그림 3.2 지상기준점 및 검사점의 위치분포

과의 관계를 계산할 수 있다. 각 영상별로 새로이 구성된 5개의 데이터 (t_i, x_i, y_i, z_i) 로부터 위성위치에 대한 외부표정요소 다항식의 초기치 추정이 가능하다.

표 3.2 위성위치의 초기치계산 자료

영상	UT	국소직각좌표			영상중심(CO) 탐측시각 UT
		X(north)	Y(west)	Z(normal)	
좌측 영상	9600.	769946.272	163662.112	787623.915	9694.441
	9660.	336639.772	286363.489	816450.757	
	9720.	-97330.841	414353.404	816863.486	
	9780.	-530295.901	540892.111	788857.847	
	9840.	-960588.952	667306.163	732541.890	
중앙 영상	8820.	858889.802	-133335.345	778492.821	8934.881
	8880.	422354.864	-23841.436	818028.990	
	8940.	-15249.391	88188.197	829249.367	
	9000.	-452230.889	202127.894	812100.712	
	9060.	-886903.742	317335.679	766637.697	
우측 영상	7680.	647905.477	-537015.559	781496.588	7774.976
	7740.	205610.403	-450284.652	813120.062	
	7800.	-237033.578	-359413.728	816604.631	
	7860.	-678309.745	-264953.080	791910.807	
	7920.	-1116506.285	-167472.069	739113.708	

3.3 SPOT 위성영상의 외부표정요소

선정된 11점의 지상기준점에 대하여 관측된 사진측정좌표와 국소직각좌표를 이용하여 SPOT 위성영상의 외부표정요소를 결정하기 위한 번들조정을 수행한 후 다음 4가지 경우에 대하여 스테레오 또는 3중 입체영상을 구성하여 그 결과를 비교 분석하였다.

- case-1 : 좌측 - 중앙 입체영상
- case-2 : 중앙 - 우측 입체영상
- case-3 : 좌측 - 우측 입체영상
- case-4 : 3중 입체영상

외부표정요소를 계산하기 위해서는 반복계산방법을 이용하므로 계산에 앞서 외부표정요소의 초기값을 결정해 주어야 한다. 결정된 초기값의 정확성이 3차원 모델링의 정밀도와 수렴여부를 좌우하게 된다. 본 연구에서는 위성영상의 보조데이터와 정밀계산이론을 이용하여 초기치를 결정하였다. 위성위치의 초기치 계산 결과는 표 3.2와 같다.

또한, 시간의 원점(time=0)을 기준으로 하여 표 3.2의 각 위성위치에 대한 UT를 상대적 시각으로 재배열할 수 있다. time=0은 첫번째 라인 탐측직전의 시각인 것으로 정의했으므로 영상중심의 UT보다 약 4.512초 $(3000\text{line} \times 1.504\text{ ms/line} = 4.512\text{ sec})$ 빠른 값을 갖는다. 따라서 각 영상에서의 위성위치와 시간

한편, 지상좌표축에 대한 센서의 자세가 주어질 경우, 센서자세에 대한 초기치도 위성노출중심 궤적의 경우와 같은 방법으로 계산할 수 있다. 이와 같은 방법으로 계산된 외부표정요소의 초기치를 표 3.3에 나타내었다.

표 3.3 외부표정요소의 초기치 계산결과

파라미터	좌측영상	중앙영상	우측영상
X0	119708.436	54843.490	-19642.937
X1	-7221.735	-7278.616	-7365.783
X2	0.140	0.086	0.190
Y0	351286.623	70118.916	-404483.855
Y1	2094.943	1873.755	1511.291
Y2	0.078	0.265	0.498
Z0	820192.902	829350.790	818401.387
Z1	7.518	26.415	54.294
Z2	-3.943	-3.936	-3.909
$\omega 0$	-0.404916	-9.653e-2	4.587e-1
$\omega 1$	-2.218e-4	-2.516e-4	-1.970e-4
$\omega 2$	-0.192e-6	-8.741e-8	1.765e-7
$\phi 0$	0.134940	3.476e-2	-5.111e-2
$\phi 1$	-8.762e-4	-9.927e-4	-1.015e-3
$\phi 2$	-3.312e-8	-2.509e-9	6.605e-8
$\kappa 0$	2.883550	2.892765	2.902591
$\kappa 1$	4.883e-4	2.314e-4	-2.744e-4
$\kappa 2$	-0.130e-6	-8.361e-8	-9.357e-8

11점의 지상기준점과 외부표정요소의 초기치를 단 모델 조정식에 적용하여 계산된 각 파라미터의 수렴

결과를 이용하여 입체쌍 구성형태 경우별로 외부표정 요소를 결정할 수 있으며 임의의 지상점에 대한 3차원 좌표를 계산할 수 있다.

3.4 3차원 모델링 정확도 평가

입체영상의 사진측정좌표가 주어질 경우, 공선조건식의 역함수를 이용하여 점 i 의 지상좌표 (X_i, Y_i, Z_i) 를 구할 수 있다²⁾ 이 방법으로 계산된 3차원 좌표를 측정값과 비교한 결과는 표 3.4와 같다.

표 3.4 지상기준점/검사점의 3차원 모델링 정확도

(단위: 미터)

Cases	지 상 기 준 점			검 사 점		
	σ_x	σ_y	σ_z	σ_x	σ_y	σ_z
case-1	7.12	6.97	10.22	9.84	10.96	16.15
case-2	7.24	6.95	3.00	11.21	10.00	11.81
case-3	6.53	6.72	3.31	10.10	9.65	6.40
case-4	6.85	8.28	3.65	9.61	8.98	6.69

case-1의 경우에 지상기준점과 검사점 모두 표고오차가 다른 경우에 비해서 크게 나타나고 있는데 이는 입체영상의 기선대 고도비가 가장 작기 때문일 것으로 추정된다. 일반적으로 기선대 고도비가 작은 경우에는 비율이 큰 경우에 비해서 위성영상의 외부표정요소 즉, 위성위치 및 자세요소의 변화 및 오차에 따른 지상위치의 변화폭 및 잔차가 크게 나타난다. case-3에서는 입체영상을 이용한 3가지 경우중에서 기선대 고도비가 가장 크기 때문에 그에 따른 지상좌표의 잔차량도 가장 작게 나타났다. 이와같은 결과로 미루어 볼 때에 3차원 모델링의 정확도 결정에 가장 큰 영향을 미치는 요인은 입체영상의 기선대 고도비임을 알 수 있다. 한편, case-4는 3중 입체영상을 이용한 모델링의 경우로서 스테레오 영상모델중에서 최상의 결과를 나타낸 case-3과 거의 같은 결과를 얻었

다. 이는 스테레오영상의 경우보다 3중입체영상 모델링의 경우에 간혹 발생하는 영상좌표의 측정오차로 인한 영향을 더욱 감소시키기 때문이다. 따라서 3장을 이용해서 모델링함으로써 정확도를 그대로 유지시키면서 모델링의 안정성을 확보할 수 있었다.

4. 수치지형 표고모델 생성

계산된 영상별 외부표정요소를 이용하여 각 영상점에 대한 지상좌표를 계산함으로써 특정 대상영역에 대한 수치지형표고모델을 그림 4.1의 과정을 거쳐 생성할 수 있다.

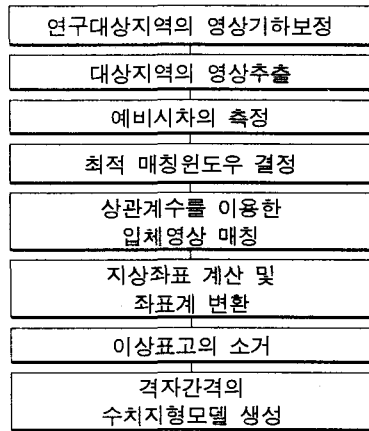


그림 4.1 수치지형모델 생성과정

4.1 입체영상 매칭

본 연구에서 적용한 입체영상매칭 기법은 영역적 매칭방법의 하나인 표준상관계수 매칭(normalized cross correlation matching)방법으로서 임의의 점 (n,m) 에서의 상관계수 $r(n,m)$ 을 구하며 상관계수는 $-1 \leq r(n,m) \leq 1$ 의 값을 갖는데 값이 클수록 매칭의 신뢰도가 높음을 의미한다. 기준영역의 크기가 작을수록 계산시간은 단축되지만 화소간의 차이가 별로없는

동질적인 지역이나 선형구조물이 있는 지역에서는 매칭오류의 발생가능성이 높기 때문에 영상의 해상력과 지형의 특성을 고려하여 예비실험을 한 후 기준영역의 크기를 결정하였다.

4.2 기하보정 및 대상지역 추출

위성영상에 대한 기하학적 보정을 통한 영상재배열을 위해 아핀변환식을 이용하였다. 영상의 기하보정에 필요한 기준점으로서 3차원 모델링을 위해 선정되었던 지상기준점 11점의 지상좌표와 영상좌표를 이용함으로써 변환의 정확성을 기하였다. 아핀변환식을 이용하여 임의의 지상좌표에 대하여 대응되는 영상좌표를 계산할 수 있으며 최소제곱해의 계산결과는 표 4.1과 같다.

표 4.1 기하보정을 위한 변환식

영 상	지상좌표로부터 영상좌표의 계산식	평균 RMSE (pixel)
좌측영상	$l = -0.09721x + 0.02291y + 2666.73443$ $p = -0.02382x - 0.08191y + 4234.56878$	0.699 7.514
중앙영상	$l = -0.09792x + 0.01970y + 2961.00994$ $p = -0.02500x - 0.09683y + 2982.45322$	1.088 2.522
우측영상	$l = -0.09933x + 0.01434y + 2964.43714$ $p = -0.01639x - 0.07982y + 3064.06648$	0.835 7.919

기하학적 보정이 완료된 각 영상에 대하여 동일한 기준점(대상지역의 좌하측 코너점)의 지상좌표로부터 일정한 영역에 포함되는 영상부분을 절취한다. 본 연구에서는 기본지도 <대전도엽> 지역을 포함하는 영역을 추출하였다.

4.3 예비시차의 측정

매칭에 앞서 입체영상의 좌측영상을 기준영상으로 하여, 우측영상(대상영상)상으로부터 기준영상에서 선정한 것과 동일한 지형지물의 영상좌표를 측정하였고 이때 측정된 두 영상좌표간의 차이량을 예비시차라 정의한다.

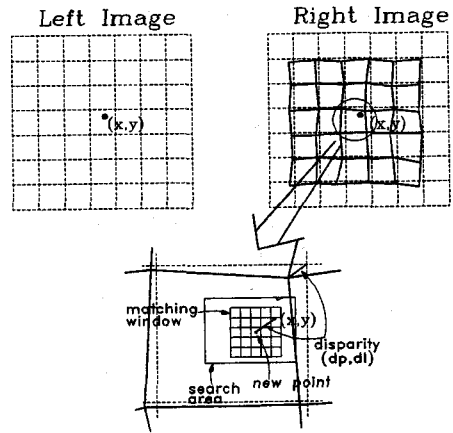


그림 4.2 예비시차의 측정 및 활용

그림 4.2에서 보는 바와같이 예비시차를 일정간격(그림에서 점선의 교차점)으로 미리 측정하여 입체매칭시에 탐색범위를 줄이기 위한 탐색윈도우의 초기이동량으로 이용함으로써 매칭속도 및 정확성을 높일 수 있다. 일반적으로 영상매칭시에 기준영상의 영상좌표(x,y)에 대하여 우측영상에서 동일한 영상점(x,y)로부터 탐색영역 내부에서 최대상관계수를 갖는 점을 선택한다. 표고가 높은 지역에서는 시차가 매우 크게 발생되므로 탐색영역을 확장시켜야 하는데 그에 따른 처리시간이 상당히 증가하는 문제점이 있다. 그러나 매칭시에 미리 측정된 예비시차 데이터를 이용하면 탐색영역의 범위를 줄일 수 있으므로 수행시간을 단축시킬 수 있다. 영상좌표(x,y)가 주어지면, 이 점으로부터 가장 가까운 예비시차 측정점의 시차(dp, dl)를 결정한 후 새로운 영상좌표(x',y')를 계산한다. 계산된 점(x',y')이 초기의 점(x,y)보다 지형의 시차특성을 적절히 반영하므로 매칭의 효율을 높일 수 있다. 이렇게 전체 영역에 대하여 약간의 작업을 통한 예비시차를 확정해 줌으로써 최소한 예비시차점 부근에서 만 큼은 정확한 매칭이 가능도록 하였으며, 탐색영역을 최소한의 크기로 제한할 수 있으므로 매칭속도의 향상이 가능해진다.

4.4 영상매칭을 위한 최적윈도우 결정

최대상관계수를 이용한 입체영상 매칭시에 매칭정확도를 향상시키고 처리속도를 개선하기 위해 요구되는 윈도우 형태 및 크기, 탐색영역 범위, 매칭임계치 등을 결정하기 위하여 앞에서 구성했던 3가지 입체쌍 각각의 좌측영상에서 100 화소의 균등한 간격으로 729점(27점×27점)의 검사점을 선정한 후, 이 점들에 대하여 우측영상의 매칭시에 윈도우에 따른 최대상관계수의 평균 및 표준편차, 매칭점의 시차를 계산하여 평가한 결과 그 절대량에 있어서는 차이가 있으나 윈도우크기가 확대됨에 따라 매칭위치의 오차가 뚜렷이 감소함을 알 수 있었다. 따라서 “윈도우크기가 증가할수록 매칭의 안정도 및 정확도는 향상된다”는 것을 확인할 수 있었다. 이상의 분석결과에 근거하여 실험에서는 주로 중앙-우측 입체영상을 이용하고 나머지 두 가지 경우는 보조적으로 이용하였다.

표 4.2 중앙-우측영상의 영상매칭

윈도우 비율	윈도우 크기	중앙-우측 영상			
		상관계수		처리 시간 (sec)	Residual (35x35기준)
		평균	표준편차		
1 : 1	7 × 7	0.8628	0.1095	28	4.1131
	9 × 9	0.8701	0.1090	42	3.0223
	15 × 15	0.8802	0.1114	101	2.3712
	21 × 21	0.8845	0.1122	192	1.8979
	25 × 25	0.8872	0.1023	270	1.6372
	27 × 27	0.8884	0.0988	316	1.3010
	33 × 33	0.8898	0.0898	470	0.7153
	35 × 35	0.8896	0.0897	529	0.0
3 : 1	9 × 3	0.8721	0.0971	19	5.3462
	15 × 5	0.8689	0.1091	39	3.1996
	21 × 7	0.8741	0.1098	68	2.3796
	27 × 9	0.8768	0.1090	110	2.1946
	33 × 11	0.8800	0.1080	159	2.0668
5 : 1	15 × 3	0.8719	0.1039	27	3.9065
	25 × 5	0.8723	0.1126	59	2.4484
	35 × 7	0.8785	0.1096	109	1.9793

영상매칭에 적합한 윈도우형태를 결정하기 위하여 윈도우모양에 따른 매칭소요시간을 측정한 결과 매칭소요시간 및 잔차량은 매칭윈도우의 형태와는 무관하며 윈도우의 면적과 밀접한 관계가 있음을 알 수 있었으며 따라서 본 실험에서는 1:1 비율의 윈도우만을 이용하였다.

본 연구에서 제작하고자 하는 수치지형표고모형의

간격이 25m 이고, 이미 수행한 3차원 모델링의 정확도가 10m 내외이었으므로, 매칭잔차가 2 화소, 즉 20m 근처의 윈도우 15×15나 21×21을 이용하는 것이 타당하다. 21×21 윈도우를 이용할 경우 15×15 윈도우의 결과와 비교해 보았을 때 잔차량측면에서 약 0.5 화소(5m)정도 개선되는 반면에 수행시간이 약 2배 정도 소요되므로 3차원 모델링 정확도와 DEM 간격, 즉 매칭간격을 고려할 때 큰 이득이 없다. 따라서 비슷한 매칭 정확도의 두 가지 윈도우 크기에 대하여 수행시간에 비중을 두어 윈도우크기 15×15를 이용하기로 하였다. 나머지 입체영상의 경우에 대해서도 동일한 윈도우를 이용하였다.

선정된 윈도우 15×15를 이용한 영상매칭에 최적인 탐색영역을 결정하기 위하여, 이미 측정된 729점의 예비시차값을 이용하여 전체 시차의 평균과 표준편차를 계산하였다.

4.5 영상매칭 및 좌표계산

입체매칭을 수행하여 두 영상간의 동일점을 결정한 후, 기하보정전 원영상에서의 화소위치를 계산하였다. 이는 지상좌표 계산시에 이용하는 외부표정요소 값이 보정전 영상의 화소값에 대한 것이기 때문이다. 기하보정을 실시한 영상의 각 화소간격이 지상에서 약 10m에 해당되므로 보정영상의 좌측측 코너원점의 지상좌표를 ($OrgX$, $OrgY$)라고 하면, 보정영상내의 임의의 점의 좌표 (l , p')에 대한 지상좌표는

$$\begin{aligned} X' &= OrgX + l \times 10 \\ Y' &= OrgY - p' \times 10 \end{aligned} \quad (1)$$

가 된다. 실험에서 이용한 각 보정영상의 지상원점은

$$(OrgX, OrgY) = (-12655.87, 20692.11) \quad (2)$$

이다. 이와같이 계산된 각 지상좌표에 대하여 아핀 변환식을 이용하여 원영상에서의 영상좌표를 계산할 수 있다. 계산된 영상좌표에 대하여 사진측정좌표를 결정한 후, 지상좌표 계산식을 이용하여 3차원 좌표를 계산한다.

4.6 수치지형표고모델의 생성

수치표고의 추출시에 연속된 두 지점간의 최대 허용 표고차이를 40m로 정하여 이 값을 벗어나는 경우에는 보간을 수행함으로써 이상표고의 발생을 제한하였다. 계산된 각 매칭점들에 대한 지상좌표는 불규칙한 공간을 형성하므로 이를 일정한 격자간격 평면상의 표고데이터로 보간하여 수치표고모델을 형성하게 된다. 불규칙한 간격의 표고로부터 격자간격의 표고로 보간시에는 일반적으로 가중평균법(weighted averaged interpolation)을 이용한다. 즉 원하는 격자점의 표고를 결정하기 위하여 격자점 주변에 위치한 n개의 표고데이터로부터 가중평균값을 계산하는 것이다.

$$Z_p = \frac{\sum_{i=1}^n Z_i W_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (3)$$

여기서, W_i 는 점 i에 대한 경중를로서 격자점과의 거리에 반비례하는 값으로 정한다.

본 연구에서는 격자간격을 25m로 선정하여 가중평균법에 의해 수치표고모델을 생성하였다. 실험에 이용한 각 입체영상에 대하여 영상의 화질 및 촬영일자 등의 매칭조건을 고려하여 그림 43과 같이 중앙-우측 입체영상에 대해서만 <대전>도엽 전체 영역에 대하여 수치표고모델을 생성하였고 나머지 좌측-중앙, 좌측-우측 입체영상에 대해서는 1/9도엽 지역만을 생성하였다.

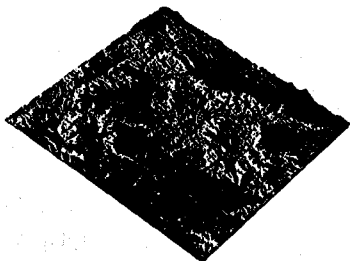


그림 43 위성사진 수치지형표고모델 (중앙-우측영상)

5. 수치지형표고모델의 위치정확도 결정 및 평가

5.1 위치정확도 결정

본 연구에서 이용한 수치지형 표고모델은 1) 항공사진 수치지형표고모델(항공사진 DEM), 2) 위성사진 수치지형표고모델(위성사진 DEM), 3) 기본지도 수치지형표고모델(기본지도 DEM), 4) 미국 국방성 지도국 제작 수치지형표고모델(DMA DTED)이며 이들 자료의 주요 특성은 표 5.1과 같다.

수치지형표고모델의 정확도를 최종적으로 평가하는데 이용될 DEM을 결정하기 위해 위의 DEM 자료로부터 데이터의 지상해상력과 크기에 따라 총 8가지의 DEM을 새로 제작하였다. 다음 표 5.2에 각각의 수치지형표고모델의 속성을 나타내었다. 이들 DEM 간의 비교는 지상해상력이 동일한 것 사이에만 가능한데 비교대상의 DEM의 종류가 많은 관계로 이들간의 구분을 용이하게 하기 위해서 편의상 case-1부터 case-8까지로 구분하였으며, DMA DTED를 제외한 2가지 100m 간격의 DEM은 각각 25m 간격의 DEM으로부터 제작된 것이다.

표 5.1 DEM 자료의 주요 특성

특성	항공사진 DEM	위성사진 DEM	기본지도 DEM	DMA DTED
이용 자료	항공사진	SPOT위성 수치영상	등고선도	항공사진 등고선도
좌표계	T M	국소 직각좌표	UTM	WGS84 축지좌표
축척	1:20,000	1:400,000	1:50,000	1:250,000
지상 해상력	25 m	25 m	25 m	3 arcsec
제작 방법	해석도화기 측정	수치영상 정합기법	디지털 타이핑	-
제작 년도	1991	1993	1993	1987

제작된 수치지형 표고모델의 평가를 위하여 기준 모델을 선정하기 위하여 <대전> 도엽지역에 대한 항공사진 수치지도 제작결과와 GPS위성측량장비를 이용하여 동일지점에 대한 현지측량결과 지상에서 식별

가능한 점 60점의 정확도는 표 5.3과 같이 모두 A급으로 나타났다.

표 5.2 수치지형표고모델 속성파라미터

DEM	Case	지상 해상력	원점 위치 (TM)		영역크기 (grid)	비 고
			경거	위거		
항공 사진 DEM	1	25 m	222,200	305,800	909×1089	1 도엽
	2	100 m	222,200	305,800	227×272	"
위성 영상 DEM	3	25 m	217,900	305,800	1100×1100	1 도엽, 중앙-우측
	4	25 m	218,900	306,100	390×390	1/9 도엽, 좌측-중앙
	5	25 m	219,000	306,100	390×390	1/9 도엽, 좌측-우측
기본 지도 DEM	6	25 m	217,900	306,000	1033×1072	1 도엽
	7	100 m	217,900	306,000	262×270	"
DMA DTED	8	100 m	217,900	306,400	263×270	"

표 5.3 항공사진 DEM의 위치정확도

오차구분	정확도
경거 표준오차	7.1 m
위거 표준오차	8.3 m
수평오차(90%확률)	16.5 m (A 급)
표고 표준오차	4.9 m
표고오차(90%확률)	8.1 m (A 급)

이처럼 양호한 결과의 수치지도와 동시에 제작된 수치지형표고모델이 앞의 표 5.2에 나타난 case-1과 case-2이다. 오늘날 알려져 있는 지도제작 방법중에서 항공사진을 이용한 경우가 가장 정확한 것으로 평가되고 있는 점을 고려하여 본 연구에서는 정확도 평가를 위한 기준으로서 표 5.2의 case -1과 case-2를 이용하였다.

평가용 수치지형표고모델이 제작되고 난 후에 이들 간의 위치정확도를 비교하기 위한 방안으로 이전에 영상매칭시에 이용했던 상관계수 기법을 그대로 이용함으로써 표고 뿐만아니라 수평위치 정확도도 측정할 수 있도록 하였다. 단지 영상매칭의 경우에는 최대상관계수 계산시에 각 화소의 계조값을 비교한 반면에 DEM의 정확도 평가시에는 각 격자점의 높이를 비교한다는 점이 다르다. 평가하고자 하는 DEM의 위치

정확도를 계산하기 위한 기준으로서 case-1과 case-2를 이용하였는데 평가대상 DEM의 지상해상력이 25m, 100m일 경우에 각각 case-1과 case-2가 이용된다. 매칭시에 상관계수기법을 이용하기 때문에 앞에 언급한 영상매칭의 경우에서와 마찬가지로 우선 윈도우에 따른 최적의 탐색영역을 결정함으로써 평가의 효율을 높일 수 있다.

윈도우별 최적의 탐색영역을 결정하기 위한 예비시험은 위성영상 DEM case-3로부터 DMA 제작 DTED case-8 까지를 수행하였다. case-1을 기준으로 하여 위의 방법으로 선정한 윈도우별로 case-3을 시험하였으며 이때의 표본추출간격은 100점, 탐색영역은 10×10을 이용하였다. 표 5.4에 case-3의 예비시험결과를 나타내었다.

표 5.4 case-3의 오차 통계량

윈도우 사이즈	Search Area	오차 평균			오차 표준편차			측 정 점
		ΔE	ΔN	ΔH	σE	σN	σH	
5×5	11×11	-4.1	10.6	-4.1	138.4	143.9	24.1	87
11×11	9×9	-3.8	-2.6	-0.1	83.5	89.2	10.1	88
21×21	6×6	-9.2	7.4	-1.1	47.1	48.8	9.5	88
31×31	4×4	-3.5	19.1	-0.2	25.6	25.7	9.7	88
41×41	3×3	-3.6	18.2	-0.5	21.1	17.2	9.5	88
51×51	3×3	-2.7	17.5	-1.7	19.7	16.2	10.4	88
61×61	3×3	-3.2	17.0	-1.4	17.7	15.5	10.5	88
71×71	2×2	-2.9	19.4	-1.7	14.8	10.4	12.9	88
81×81	2×2	-1.9	18.2	0.1	14.2	10.9	8.1	77
91×91	2×2	-0.4	19.0	0.3	12.5	7.0	14.7	70

5.2 위치정확도 평가

항공사진으로부터 제작된 DEM을 기준으로 하여 SPOT 위성영상으로부터 제작된 DEM을 비롯한 기본 지도 DEM 및 DMA DTED를 상관계수기법을 적용하여 대응지점을 탐색한 결과 평가대상의 모든 DEM이 어느 정도의 평균오차량(μ)과 표준편차(σ)를 가지고 있음을 알 수 있다. 본 연구에서는 DEM의 위치정확도 평가를 위해 매칭을 통해 계산된 TM 좌표 (경거, 위거, 표고)의 평균오차 및 표준편차에 원형공산오차 개념을 적용하여 수평위치오차와 표고오차를 계산하

였다. 시험점들의 수평위치 정확도를 평가하는 경우에는 원형공산오차(CEP, circular error probable) 개념이 이용된다. CEP는 일반적으로 시험점들의 50%가 포함되는 원의 반경으로 정의되지만, 지도 및 지형과 관련된 분석의 경우에는 90% 확률이 포함되는 원의 반경으로 정의하여 적용한다.³⁾

앞의 DEM 매칭시에 DEM case별로 계산된 오차통계량을 검토해 본 결과, 대부분이 윈도우 41×41 이상의 경우에 표준편차값이 안정된다는 점을 확인하고 정확도 평가시에는 윈도우 41×41의 경우만을 대상으로 하였다. 표 5.5에 각 DEM에 대하여 실험한 오차통계량 중에서 윈도우 41×41의 경우만을 요약하였다.

표 5.5 윈도우 41×41에 대한 수치지형표고모델 오차통계량

단위 : 미터

DEM case	오차 평균			오차 표준편차			비 고
	ΔE	ΔN	Δh	σE	σN	σh	
3	-3.6	18.2	-0.5	21.1	17.2	9.5	위성영상 25m (중앙-우측)
4	-13.9	-16.3	-9.5	44.5	41.5	13.6	위성영상 25m (좌측-중앙)
5	-6.0	-11.8	-0.8	52.3	44.2	16.3	위성영상 25m (좌측-우측)
6	-4.5	-4.7	0.2	28.7	25.0	10.8	지도 25m
7	-1.2	-30.3	-1.6	16.2	19.5	14.7	지도 100 m
8	-1.4	-19.5	-10.8	10.4	16.7	15.6	DMA 100 m

표 5.5에 나타난 각 DEM의 오차평균과 표준편차를 계산하여 표준 수평위치오차 및 표준 표고오차를 계산하면 표 5.6과 같다.

표 5.6 수치지형표고모델 위치정확도 (90% 확률)

DEM case	수평위치오차	표고위치오차
3	49.5 m	16.1 m
4	97.8 m	31.9 m
5	105.8 m	27.6 m
6	58.6 m	18.0 m
7	57.2 m	25.8 m
8	44.3 m	33.6 m

위치정확도의 계산결과 위성영상으로부터 제작된 DEM의 경우에 case-3가 가장 정확하게 나타났는데 이는 입체영상의 화질이 서로 비슷하여 매칭이 양호했기 때문으로 생각된다. case-5(좌측-우측영상)의 경우 입체영상의 기선고도비가 0.82로서 3차원 모델링의 결과는 가장 양호했으나 시차영향으로 인한 매칭의 부정확성 때문에 DEM의 정확도는 가장 불량했다. 세 가지 DEM의 정확도를 분석해 보면, 위성영상으로부터 정확한 수치지형표고모델을 제작하기 위해서는 입체영상이 동일계절에 짧은 시간간격으로 촬영되어야 하며 기선대고도비가 1.0에 가까워야 함을 알 수 있다. 기본지도 DEM(case-6, -7)의 경우에 데이터 간격에 따른 정확도 변화는 거의 없는 것으로 나타났다. DMA에서 제작한 DEM(case-8)의 위치정확도 계산결과는 DMA 자체에서 발표한 위치오차(수평오차: 50m, 표고오차: 30m)와 거의 일치하게 나타났다.

이상의 분석결과로부터 본 연구에서 제시한 공분산 해석기법을 이용한 정확도 평가방법이 합리적임을 입증하였다. 표 5.6에서 계산된 위치오차를 1:50,000 기본지도의 지도정확도 평가기준에 적용시킨 등급판정 결과는 표 5.7과 같다.

표 5.7 수치지형표고모델 정확도 등급

DEM case	수평 정확도	표고 정확도	비 고
3	B	B	위성사진(25m×25m)
4	C	C	"
5	C	C	"
6	C	B	지도(25m×25m)
7	C	C	지도(100m×100m)
8	B	C	DMA(100m×100m)

표 5.7에서 보는바와 같이 위성영상 DEM case-3가 가장 우수하였고 25m간격의 기본지도 DEM, DMA DTED도 양호하였다. 따라서 위성영상으로부터 수치지형표고모델을 제작할 경우에 위에서 제시한 영상촬영조건을 만족한다면 지금까지 주로 이용했던 기본지도 DEM이나 DMA DTED보다 양호한 성과를 얻을 수 있었다.

6. 결 론

본 연구에서는 SPOT 위성데이터를 이용하여 기하학적 모델링을 수행한 후 축척 1:50,000 국가기본지도 1 도엽(대전) 영역의 수치지형표고모형을 생성하여 그 정확도를 평가한 결과 다음과 같은 연구결과를 얻었다.

- 1) SPOT 3중 입체영상의 기하학적 모델링을 수행함으로써 모델링의 정확도 및 안정성을 향상시켰다. 또한 외부표정요소의 초기치 추정방법을 개발함으로써 위성의 외부표정요소 계산속도와 정확도를 향상시켰다.
- 2) 수치적 방법으로 입체모델에서의 동일점을 찾기 위하여 상관계수를 이용한 매칭기법을 적용하였고, 예비시험을 수행하여 일정간격의 영상점에 대한 시차를 측정함으로써 매칭시의 효율을 향상시켰다. 또한 각 입체위성영상 모델에 적합한 기준영역의 형태 및 크기, 탐색영역의 크기, 매칭 임계치의 결정방법을 제시하였다.
- 3) 지금까지 위성데이터를 이용하여 수치지형표고모형을 생성하고자 했던 대부분의 연구는 특정한 실험지역(수 km×수 km)을 대상으로 했기 때문에 실제 활용상의 문제가 있었다. 본 연구에서 생성한 수치지형표고모형은 1:50,000 기본지도의 1 도엽 영역(약 28 km×28 km)으로서 실용적 활용가치를 증대시켰다.
- 4) 위치정확도 평가시에 영상매칭을 위해 이용했던 상관계수 기법을 수정 적용하여 지형의 특성을 비교함으로써 지형의 수평위치 정확도와 표고정확도를 계산할 수 있었다.
- 5) 위치정확도 A급인 항공사진 수치지형표고모형을 기준으로 하여 본 연구에서 제작한 위성사진 수치지형표고모형, 기본지도를 이용한 수치지형표고모형, 미국 국방성지도국(DMA)에서 제작한 수치지형표고모형의 위치정확도를 평가한 결과

위성사진 수치지형표고모형의 정확도가 가장 우수한 것으로 판명되었다.

향후의 연구방향으로는 3중 입체영상의 모델링 후 수치지형표고모형의 생성시 3가지 스테레오매칭 결과의 경중를 고려한 최확치 계산방법과 1화소 간격의 매칭할 경우의 정확도 향상방법과 처리시간의 단축방안에 대한 연구가 진행될 것이다.

참 고 문 헌

1. ERDAS, "ERDAS FieldGuide" pp.30-43, 1990
2. Ghosh, S.K., "Analytical Photogrammetry", Pergamon Press, 1979
3. Przemieniecki, J.S., "Introduction to Mathematical Methods in Defense Analyses", AIAA Education Series, 1990
4. Russell Priebbenow, Enrico Clerici, "Cartographic Applications of SPOT Imagery," *IAPRS*, Vol. 27, Part B4, pp.289-297, 1988
5. Fukushima, Y., "Generation of DTM using SPOT Image Mt. Fuji by Digital Image Correlation," *IAPRS*, Vol. 27, Part B3, pp.225-235, 1988
6. Deren, L. and C. Jiayu, "Bundle Adjustment of SPOT Imagery," *ISPRS*, Vol. 27, Commission III, pp.449-455, 1988
7. Lee, L-H and L-C Chen, "Bundle Adjustment with Additional Parameters for SPOT Stereopairs," *IAPRS*, Vol. 27, Part B8, pp.III-1~III-11, 1988
8. Liang-Chien Chen, Liang-Hwei Lee, "Rigorous Generation of Digital Orthophotos from SPOT Images," *PE & RS*, Vol. 59, No. 5, pp.655-661, 1993
9. 국방과학연구소, "SPOT 위성영상을 이용한 수치지형모형 자동생성 및 응용", MSDC-408-92492, 1992

10. Otto, G.P., "Rectification of SPOT Data for Stereo Image Matching," *IAPRS*, Vol. 27, Part B3, pp.635-645, 1988
11. Day, T., J-P Muller, "Quality Assessment of Digital Elevation Models Produced by Automatic Stereo Matchers from SPOT Image Pairs," *IAPRS*, Vol. 27, Part B3, pp.148-159, 1988
12. Rodriguez, V., et al, "Evaluation of the Stereoscopic Accuracy of the SPOT Satellite," *PE & RS*, Vol. 54, No. 2, pp.217-221, 1988