

KOMPSAT-1 EOC 입체 영상을 이용한 DEM 생성과 정확도 검증

임용조* · 김태정* · 김준식**

한국과학기술원 인공위성연구센터*, 한국과학기술원 전자공학과**

DEM Extraction from KOMPSAT-1 EOC Stereo Images and Accuracy Assessment

Yong-Jo Im*, Tae-Jung Kim*, and Jun-Sik Kim**

Satellite Technology Research Center, KAIST*, Dept. of Electrical Engineering and Computer Science, KAIST**

Abstract : We carried out accuracy assessment for DEM extraction from the KOMPSAT-1 EOC stereo images over Daejeon and Nonsan in Korea. DEM generation divided into two parts. One is camera modeling and the other stereo matching. We used Orun & Natarajan's(1994) model and Gupta & Hartley's(1997) model in the camera modeling step and checked the possibility using Orun & Natarajan and Gupta & Hartley's models in EOC stereo pairs.

For stereo matching, we used an algorithms developed in-house for SPOT images and showed that this algorithm could work with EOC images. Using these algorithms, DEMs were successfully generated from EOC images. The comparison of DEM from EOC Images with a DEM from SPOT Images showed that EOC could be used for high-accuracy DEM generation.

Key Words : DEM, Sensor Modeling, Stereo Matching, KOMPSAT-1 EOC.

요약 : 본 논문에서는 대전과 논산지역의 KOMPSAT-1 EOC입체 영상으로부터 DEM을 생성하고 정확도를 검증하였다. DEM생성 과정을 크게 카메라 모델링 단계와 영상 정합 단계로 구분하여 논의하였으며 카메라 모델링 기법은 Orun과 Natarajan이 제안한 모델(1994)과 Gupta와 Hartley(1997)가 제안한DLT모델을 사용하였으며 두 모델링 기법을 EOC입체 영상에 적용하는 것이 가능한지 확인하였다.

영상정합 단계에서는SPOT용으로 개발된 알고리즘이 EOC입체 영상에 적용될 수 있는지를 검토하였다. 그리고 각 단계마다 EOC영상에 적용했을 때의 결과를 SPOT영상을 적용했을 때의 결과와 비교하였다. 본 실험에서 KOMPSAT-1 EOC입체 영상에 대해 카메라 모델링 기법과 영상 정합을 수행하여 DEM을 생성한 결과 SPOT입체 영상에서 생성한 DEM 보다 성능이 우수한 DEM을 얻을 수 있었다.

1. 서론

KOMPSAT-1 EOC(Electro-Optical Camera) 센서는 SPOT과 같은 선형 푸시브room(push-broom) 주사(scan)방식을 취하며, 지상 해상도가 약 6.6m 이고 촬영폭(swath width)은 약 17km인 지구 관측 센서이다. 또한 EOC 센서는 3차원 지형정보 추출에 필요한 입체 영상을 얻기 위해 위성체의 진행방향에서 직각 방향으로(45도까지 위성체를 움직여 지표면을 촬영한다.

이렇게 획득한 EOC입체 영상은 Digital Elevation Model(DEM), 정사 영상(ortho image), 영상 지도 제작 등에 활용할 수 있다. 특히 DEM은 정사 영상, 영상 지도 제작에 입력 자료로 사용되는 자료로서 DEM에 내재하고 있는 오차가 이차 생성물에 전파되므로 DEM생성 방법의 신뢰도와 정확도를 검증하는 것이 반드시 필요하다.

본 논문에서는 대전과 논산지역을 촬영한 EOC 입체 영상으로부터 DEM을 생성하는 실험을 수행하였고 각각의 DEM생성 단계의 결과를 SPOT영상에서 DEM을 생성하는 과정과 비교하여 성능을 분석하였고, 3초의 해상도를 갖는 USGS DTED를 사용하여 정확도를 검증하였다. EOC영상으로부터 DEM을 생성하는 작업은 한국과학기술원(KAIST) 인공위성연구센터에서 개발한 SPOT영상으로부터 DEM생성을 위한 알고리즘을 사용하여 이루어졌다(Lee *et al.*, 1999).

DEM생성 과정은 크게 카메라 모델링 단계와 영상 정합 단계로 구분할 수 있다. 카메라 모델링이란 촬영시의 영상 좌표계 혹은 카메라 좌표계와 지상 좌표계와의 기하학적 관계를 복원하는 과정을 의미하며 카메라 모델링의 정확도는 생성하는 DEM의 성능에 직접적인 영향을 미친다. 본 논문에서는 카메라 모델링 단계에서 Orun과 Natarajan (1994)이 SPOT영상용으로 제안한 카메라 모델링 기술(이하 "ON 모델"이라 칭함)과 Gupta와 Hartley(1997)가 제안한 DLT모델(이하 "DLT 모델"이라 칭함)이 EOC입체 영상을 이용한 DEM

생성에 적용될 수 있는지를 검토한다.

카메라 모델 수립 후에는 좌우 영상의 상응점(conjugate pairs, corresponding points)을 찾는 과정이 필요하고 이를 영상 정합(stereo matching)이라 한다. 본 연구에서는 정합점들의 유사도 측정방법으로 정규화 교차 상관도(normalized zero-mean cross correlation)를 사용하였으며, EOC와 SPOT의 영상 정합 결과를 비교하기 위해 ON모델과 DLT 모델별로 정규화 교차 상관도를 이용한 정합 방법을 실험하였다.

영상 정합 단계가 끝나게 되면 카메라 모델링을 이용하여 정합점(matching points)들의 3차원 지리 좌표를 구할 수 있으며 이러한 정합점을 내삽(interpolation)하여 DEM을 생성할 수 있게 된다. 본 연구에서는 가우시안(gaussian) 기법을 이용하여 정합점들을 내삽하였으며, 결과의 정확도를 USGS DTED와 비교하였다.

2. 이론적 배경

본 논문에서는 입체 위성 영상을 이용한 DEM 생성을 설명하기 위해 크게 카메라 모델링 과정과 좌우 영상에 대한 영상 정합 과정으로 구분하여 살펴보기로 한다.

1) 카메라 모델링

카메라 모델링이란 촬영순간의 위성체의 위치와 자세에 따른 지상좌표와의 관계를 나타낸 것이다. 항공 사진의 경우 주어진 입체 영상과 지상 기준점(Ground Control Points: GCP)을 이용하여 공선 방정식(collinearity equation)을 세우고 이 방정식의 외부표정 6요소를 구하는 공간후방교선(space resection) 단계와 구해진 계수와 공선방정식을 이용하여 실제로 입체 영상에서 얻어낸 상응점을 3차원 좌표로 변환하는 공간전방교선(space intersection) 단계를 거친다. 그러나 위성 영상의 경우 항공 사진과 달리 촬영순간의 위치와 자세가 수시로 바뀌기 때문에 항공 사진의 카메라 모델링

보다 복잡하다.

카메라 모델은 크게 물리적 모델, 추상적 모델, 일반화 모델과 같이 세가지로 구분할 수 있다(김태정 외, 2000). 이중 물리적 모델은 촬영시간 t 에서 지상 좌표계의 한 점 (X, Y, Z) 과 위성 CCD소자의 한 점이 $(0, y, -f)$ 일 때 다음 식(1)과 같은 공선 방정식을 이용하는 모델이다.

$$\begin{aligned} x=0 &= -f \frac{r_{11}(X-X_0) + r_{21}(Y-Y_0) + r_{31}(Z-Z_0)}{r_{13}(X-X_0) + r_{23}(Y-Y_0) + r_{33}(Z-Z_0)} \\ y &= -f \frac{r_{12}(X-X_0) + r_{22}(Y-Y_0) + r_{32}(Z-Z_0)}{r_{13}(X-X_0) + r_{23}(Y-Y_0) + r_{33}(Z-Z_0)} \end{aligned} \quad (1)$$

이때 (X_0, Y_0, Z_0) 는 촬영순간의 시각 t_0 에서 위성카메라 좌표계 원점의 지상좌표이며, $r_{11} \sim r_{33}$ 은 위성 카메라 기준좌표를 지상 좌표계로 변환하는 회전변환 행렬이며, f 는 초점거리이다. 여기서 푸시부름(push-broom) 방식의 센서는 위성이 이동을 하면서 촬영을 하므로 위성의 위치 (X_0, Y_0, Z_0) 와 위성의 자세 κ, ϕ, ω 를 시간에 대한 함수로 모델링이 가능하며 시간 t 는 영상의 행 좌표로 대치할 수 있다. Orun과 Natarajan(1994)은 다음 식(2)와 같이 위성체의 pitch와 roll각은 시간에 대하여 변하지 않는 상수로 놓고 나머지 4개의 변수를 시간에 대해 2차식으로 모델링하는 방법을 제시하였다.

$$\begin{aligned} X_s &= X_0 + a_1t + b_1t^2 \\ Y_s &= Y_0 + a_2t + b_2t^2 \\ Z_s &= Z_0 + a_3t + b_3t^2 \\ \kappa &= \kappa_0 + a_4t + b_4t^2 \end{aligned} \quad (2)$$

이러한 물리적 모델은 위성의 궤도에 대한 매우 상세한 정보 및 카메라에 대한 정보를 가지고 있어야 하나 어떤 경우에는 이러한 정보들이 확보되지 못할 때가 있다. 또한 물리적 모델은 일반적으로 위성궤도 역학을 고려하여 매우 복잡한 과정을 거쳐야 얻을 수 있는 모델이므로 이를 단순화시켜야 할 경우도 생긴다. 이런 경우 사용할 수 있는 모델링 기법이 추상적 모델이다.

추상적 모델 중 본 논문에서는 Gupta와 Hartley(1997)가 제안한 DLT모델을 이용하였다. DLT모델에서 영상의 한 점을 점라 하고 그에 상응하는

지상의 좌표를 라고 가정할 때 아래 식(3)과 같은 4×3 행렬로 모델링 할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} u \\ vw \\ w \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & f & P_v \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1/V_x & 0 & 0 \\ -V_y/V_x & 1 & 0 \\ -V_z/V_x & 0 & 1 \end{pmatrix} (\mathbf{R} | -\mathbf{RT}) \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$= \mathbf{M}(x, y, z, 1)^T$$

식(3)에서 P_v 는 CCD 소자의 시작점과 주점의 차이인 offset이며 w 는 축척 계수(scale factor)이고, V_x, V_y, V_z 는 위성체의 이동속도이다. 또한 \mathbf{R} 은 지상 좌표계를 기준시각에 해당하는 위성 좌표계에 맞도록 회전 이동하는 회전행렬이며 \mathbf{T} 는 지상 기준 좌표계 상에서의 기준 시각의 위성 좌표계 원점의 좌표값이다(김태정 외, 2000).

2) 영상 정합(stereo matching)

촬영 영역이 겹치고 촬영 각도가 다른 좌우 영상 혹은 두 장 이상의 영상에서 정합점(conjugate pairs, corresponding points)을 찾는 과정을 영상 정합(stereo matching)이라 한다. 현재까지 많은 영상 정합 기법이 개발되어 있으며 크게 특성기반 정합 알고리즘(feature-based stereo matching algorithms)과 영역기반 정합 알고리즘(area-based stereo matching algorithms)으로 나눌 수 있다. 특성기반 정합 알고리즘은 영상 내에 존재하는 경계점, 선 등과 같은 특성 정보를 이용하는 기법으로 영역기반 정합 알고리즘에 비해 속도가 빠르나 특성 정보가 없는 곳에서는 정합이 불가능하다는 단점을 가지고 있다. 영역기반 정합 알고리즘은 영상의 화소값을 사용하는 기법으로 좌우 두 영상간에 윈도우를 정의하고 윈도우안에 포함된 픽셀값들의 밝기값을 이용하여 유사도를 측정하는 기법으로 탐색하는 공간이 영역기반 정합 알고리즘에 비해 많아 시간이 많이 걸리는 단점을 가지고 있다.

본 논문에서는 보다 조밀하게 높이정보를 복원할 수 있는 영역기반 정합 알고리즘을 사용하였다. 그러나 영역기반 정합 알고리즘을 사용할 때 전체영상에 대해 탐색을 할 경우 수행시간이 매우 오래 걸리며 위성 영상의 경우 유사한 패턴이 매우 반복적으로 발생하므로 전체 영상을 탐색할 경

우 다수의 유사한 패턴에 의해 지역 최대치(local maximum)가 발생할 가능성이 많아 효과적인 탐색전략을 수립할 필요가 있다.

본 연구에서는 ON모델 또는 DLT모델로부터 에피폴라(epipolar) 특성곡선을 정확히 계산한 후, 탐색 영역을 에피폴라 특성곡선상의 일정부분으로 제한하여 탐색속도를 향상시켰다(Kim, 2000).

영역 확장 알고리즘(region growing algorithms)은 초기 정합 후보점을 사용자로부터 입력 받아 정합을 수행하고 정합점과 이웃한 점을 다시 정합 후보점으로 사용하여 정합 후보점이 존재하지 않을 때까지 반복하는 기법이다. 영역 확장 알고리즘은 영역을 확장해 나가는 과정에서 정합 후보점을 사용하여 매우 효율적으로 전체 영상에 대한 정합점을 계산할 수 있다. 그러나 영역 확장 알고리즘은 오류전파의 치명적인 단점이 존재한다.

본 연구에서는 오류전파를 최소화하기 위해서 정합점으로부터 3차원 좌표를 구하고, 이와 인접한 점의 높이를 정합점의 높이와 같다고 가정한 후, 이 높이에 해당하는 우측 영상점을 다시 역으로 산출하여 이점을 정합 후보점으로 사용하였다(Kim et al., 2001)

밝기값 상관 알고리즘은 좌우영상에서 정의된 두 윈도우 사이의 유사성을 비교하기 위해 윈도우 안에 포함된 밝기값들의 공분산이나 평균과 같은 통계를 이용하여 유사도를 측정하는 방법이다. 이러한 유사도를 측정하는 방법에는 교차 상관(cross

correlations) 알고리즘, 정규화 교차 상관(zero mean normalized cross correlation) 알고리즘, 가우시안(gaussian) 기반 알고리즘, 라플라시안(laplacian) 기반 알고리즘이 있다.

본 연구에서는 정규화 교차 상관 알고리즘을 사용하였으며 다음 식(4)와 같다.

$$C(A, B) = \frac{\sum \sum ((A_{ij} - \bar{A}) \times (B_{ij} - \bar{B}))}{\sqrt{\sum \sum (A_{ij} - \bar{A})^2 \times (B_{ij} - \bar{B})^2}} \quad (4)$$

식(4)에서 A와 B는 좌우측 영상에서 윈도우안에 포함되는 화소값을 의미하며 \bar{A} 와 \bar{B} 는 목적 윈도우와 검색 윈도우에 포함하는 화소들의 평균값이다. 또한 교차상관도 값은 -1에서 1의 범위를 갖고 1에 가까이 갈수록 유사성이 많고 유사성이 없을 경우 -1에 가까이 간다.

3. 연구 방법

본 실험에 사용한 EOC영상은 2000년 3월 9일(좌측 영상)과 3월 1일(우측 영상)에 촬영한 대전 지역 EOC입체 영상과, 2000년 5월 1일(좌측 영상)과 4월 28일(우측 영상)에 촬영한 논산지역 입체 영상이다. 좌우측 영상의 촬영각도는 대전지역 영상의 경우 각각 동쪽방향으로 26°, 서쪽방향으로 4°이며 논산지역 영상인 경우 동쪽으로 19°, 서쪽으로 12°이다. 실험에 사용한 SPOT영상과 EOC영

Table 1. Characteristics of stereo pairs used for experiments.

Sensor	KOMPSAT-1 EOC		SPOT
	Daejeon	Nonsan	Daejeon and Nonsan
Area			
Acquisition Date	9 March 2000(Left) 1 March 2000(right)	1 May 2000(Left) 28 April 2000(Right)	15 Nov. 1997(Left) 14 Oct. 1997(Right)
Tilt Angle (negative when tilt to the west)	26°(Left) -4°(Right)	19°(Left) -12°(Right)	4.2°(Left) -28.7°(Right)
Spatial Resolution	6.6 m		10 m
No of Pixels, Lines	2592, 2796		6000, 6000
Swath(Field of View)	17 km(1.42°)		60 km(4.13°)
No. of GCPs	30	25	21

상의 특징은 Table 1에 자세히 정리하였다.

실험에 사용된 지상 기준점들은 DGPS처리 기법을 이용하여 취득하였고 삼변망 조정을 통해 정확도 검증을 수행한 측량점들을 사용하였다. SPOT영상에 대한 지상 기준점은 21개의 지상 기준점을 사용하였으며, EOC영상의 지상 기준점은

대전지역의 경우 30개 지점이고 논산지역의 경우 25개의 지상 기준점을 사용하였다. 또한 SPOT과 EOC영상에서 사용한 지상 기준점은 모두 좌우 영상 중에서 겹치는 영역에 대해서만 취득하였다. 지상 기준점의 분포는 다음 Fig. 1과 같다.

Fig 1(a)와 (b)의 흰색 실선은 EOC입체 영상에

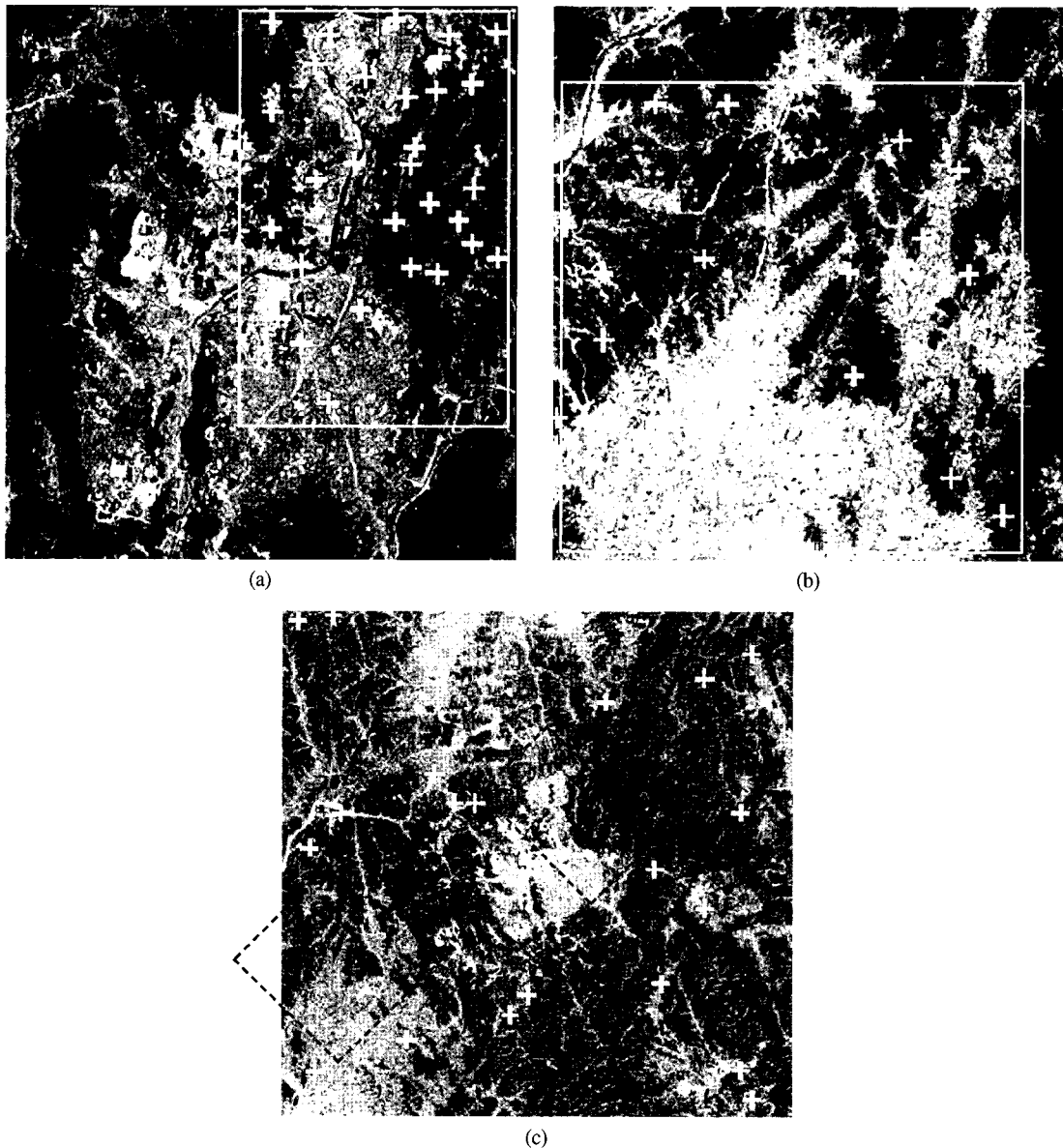


Fig. 1. Crosses in each image are the location of ground control points. Note that the (printed) scales of the EOC and SPOT images are not same. (a) EOC Daejeon, (b) EOC Nonsan, (c) SPOT.

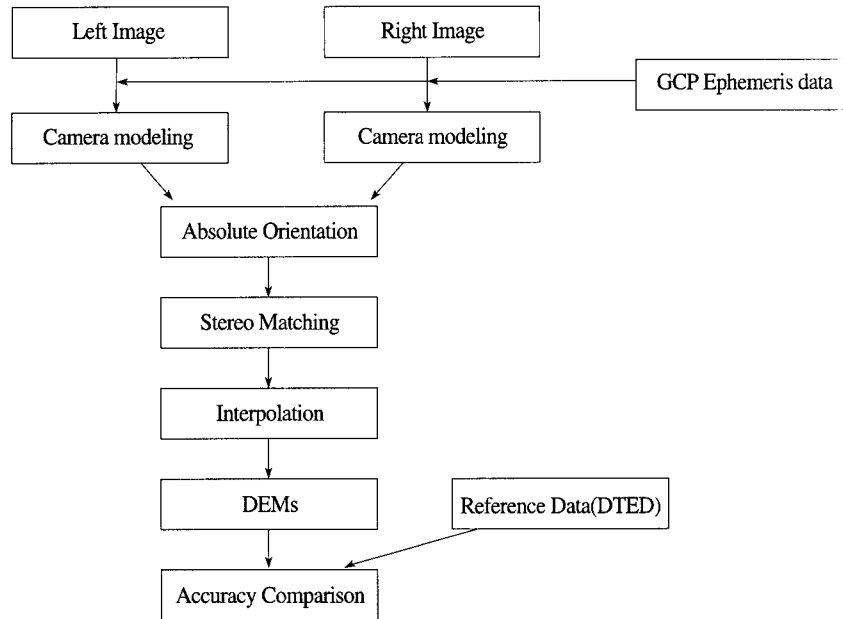


Fig. 2. Procedure of DEM extraction experiments.

서 겹치는 지역을 표시한 것이며, Fig 1(c)의 점선은 EOC입체 영상의 겹치는 부분을 SPOT영상에 표시한 것이다.

지상 기준점들의 분포는 카메라 모델링의 결과에 매우 중요한 영향을 준다. 카메라 모델링에 사용하는 지상 기준점들의 분포는 가급적 널리 골고루 분포하여야 하며 좌우 영상이 겹치는 부분에서 네 모서리 부분에 최대한 근접시켰다.

다음 Fig. 2는 입체 영상에서 DEM을 생성하기까지의 전체 실험 과정을 도식화한 것이다. Fig. 2의 카메라 모델링 단계에서는 EOC영상과 SPOT 영상 각각에 ON모델과 DLT모델을 적용한 후 ON모델과 DLT모델이 EOC영상에 적용 가능성을 살펴보았으며, 영상 정합 단계에서는 EOC영상과 SPOT영상 각각에 동일한 영상정합 알고리즘을 적용하여 CPU프로세싱 시간과 정합점들의 숫자를 확인하여 성능을 비교하였다.

실험에 사용한 영상 정합 알고리즘은 앞 절에서 설명한 바와 같이 선형 푸시브룸 방식으로 촬영된 좌우 위성영상에서 쌍곡선 형태로 표현되는 에피폴라(epipolar) 특성곡선 상의 각 점들 간의

정규화된 상관계수를 구하고 이중 최고치를 정합점쌍으로 결정하는 기법을 사용하였다.

최종적인 단계에서는 EOC와 SPOT에서 각각의 모델링을 사용하여 정합된 결과를 가우시안 내삽(gaussian interpolation)을 적용하였으며 DEM을 생성하고 모든 정합점에 대해 미국 USGS의 3초 DTED와 비교하여 정확도를 검증하였다¹⁾.

편의상 앞으로 SPOT에서 생성한 DEM을 SPOT DEM이라 하고, EOC에서 생성한 DEM을 EOC DEM이라 명명하기로 한다.

4. 연구 결과

1) 카메라 모델링 결과

본 실험에서는 먼저 SPOT용으로 개발된 ON모델과 DLT모델이 EOC위성영상에도 적용될 수 있

1) 선행연구(Lee et al, 1999)에서 지상 기준점과 USGS DTED를 비교하였으며 그 결과 USGS DTED가 DEM의 정확도 분석에 사용되는 것은 적합하다는 결론을 내릴 수 있었다(평균 수직오차: 1.5m, 표준 편차: 6.5m).

는지를 확인하고자 하였다. 대전과 논산지역 EOC 영상과 SPOT 위성영상에 GCP와 Ephemeris Data를 이용하여 ON모델과 DLT모델을 적용하였으며 EOC영상의 Ephemeris Data와 GCP는 한국항공우주연구원에서 제공한 데이터를 사용하였다.

카메라 모델링의 성능분석을 위해 EOC와 SPOT영상에서 GCP를 이용하여 카메라 모델을 수립한 후 지상 기준점을 하나씩 증가시켜 모델 에러를 검토하였으며 나머지 지상 기준점을 검사점으로 사용하여 검사점 에러를 확인하였다. 예를 들어 대전 EOC영상의 경우 총 30개의 지상 기준점에서 8점을 모델링에 사용하여 카메라 모델을 수립한 후 8점의 지리좌표를 역으로 카메라 모델에 적용하여 계산된 영상좌표와 지상 기준점의 영상좌표를 비교하여 모델 오차를 계산하였다. 또한 나머지 22개의 지상 기준점은 검사점으로 사용하여 검사점 오차를 확인하였다. 또한 각 실험 단계마다 모델점은 하나씩 증가시키고 검사점은 하나씩 감소시켜 결과를 살펴 보았다.

각각의 지상 기준점수에 대한 모델점 및 검사점 에러를 Table 2에 정리하였다.

Table 2에서 보는 바와 같이 SPOT영상과 EOC

영상에 ON모델과 DLT모델을 적용한 결과 8개 이상의 지상 기준점을 사용할 경우 1픽셀 이내의 정확도를 가짐을 확인할 수 있다. 또한 ON모델의 경우 모델점의 수가 증가함에 따라 모델 에러는 상승하고 검사점 에러는 감소하는 양상을 보이며 대략 15개의 지상 기준점을 모델링에 사용할 경우 오차가 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 양상은 김태정 *et al.*(2000)이 실험한 바와 같이 SPOT 위성영상을 이용하여 실험하였을 경우에도 동일하게 발생되었다.

또한 물리적 모델이 추상적 모델보다 정확도가 좋다는 일반적인 현상과 같이 본 실험에서도 SPOT영상과 EOC영상은 추상적 모델인 DLT모델보다 물리적 모델인 ON모델이 전반적으로 정확도가 유사하거나 높게 나왔다.

본 실험의 결과, EOC영상의 경우 1픽셀 이내의 오차를 보이고 모델 오차와 검사점 오차도 SPOT의 경우와 크게 차이가 없음을 확인하였다. 이는 아리랑 1호 EOC 위성영상의 카메라 모델링을 위하여 ON모델과 DLT모델을 사용할 수 있으며 EOC영상과 같이 제공되는 보조 자료(ancillary data)를 사용하는데 문제가 없음을 의미한다.

Table 2. Accuracy of camera models(root mean square errors(RMSE) in pixels).

Image Camera Model	EOC Daejeon(left)				EOC Nonsan(left)				SPOT(left)			
	ON		DLT		ON		DLT		ON		DLT	
No of Model points	Model RMSE	Check RMSE	Model RMSE	Check RMSE	Model RMSE	Check RMSE	Model RMSE	Check RMSE	Model RMSE	Check RMSE	Model RMSE	Check RMSE
8	0.4	0.9	0.64	3.54	0.36	0.73	0.46	0.77	0.08	0.53	0.32	0.81
9	0.39	0.92	0.79	1.33	0.36	0.75	0.47	0.76	0.13	0.55	0.33	0.67
10	0.54	0.85	0.85	1.48	0.39	0.74	0.49	0.66	0.17	0.57	0.33	0.67
11	0.61	0.83	0.90	1.16	0.42	0.71	0.48	0.68	0.27	0.54	0.34	0.6
12	0.61	0.83	0.86	1.25	0.48	0.66	0.49	0.68	0.28	0.57	0.33	0.64
13	0.66	0.81	0.88	1.46	0.46	0.69	0.5	0.69	0.28	0.59	0.32	0.68
14	0.65	0.83	0.85	1.41	0.48	0.72	0.51	0.7	0.29	0.62	0.34	0.71
15	0.63	0.85	0.83	1.22	0.47	0.77	0.49	0.74	0.32	0.57	0.38	0.66
16	0.63	0.86	0.80	1.02	0.48	0.77	0.48	0.78	0.34	0.54	0.41	0.61
17	0.64	0.88	0.79	1.07	0.49	0.76	0.49	0.8	0.34	0.55	0.4	0.68
18	0.65	0.93	0.78	1.12	0.49	0.79	0.49	0.82	0.37	0.46	0.41	0.72

Table 3. Accuracy of absolute orientation.

Image	EOC Daejeon		EOC Nonsan		SPOT	
	ON	DLT	ON	DLT	ON	DLT
Camera Model						
Horizontal accuracy(RMS error)	4.24m	5.14m	2.84m	3.21m	3.56m	3.18m
Vertical accuracy(RMS error)	4.97m	6.37m	2.39m	2.21m	9.51m	4.94m

Table 3은 각 영상에 대해 모든 지상 기준점을 이용하여 카메라 모델을 수립하고 지상 기준점의 영상좌표를 카메라 모델에 적용하여 지리좌표를 계산하고 실제 측량한 지리좌표와 비교한 결과이다. 그 결과 EOC영상 및 SPOT영상에서 모두 수평과 수직오차가 1픽셀 이내로 떨어짐을 확인하였으며 이는 EOC영상의 space intersection에 ON모델과 DLT모델을 사용할 수 있음을 보여준다.

Table 3의 결과에서 특이한 현상은 SPOT영상의 경우 ON모델의 정확도 보다 DLT모델의 정확도가 오히려 좋게 나온 점이다. 이 특이 현상은 에러를 보유한 지상 기준점의 특정한 배치 때문에 생긴 현상으로 생각되나 정확한 원인 규명을 위해서는 추가적인 연구가 필요하다.

2) 영상 정합과 DEM생성결과

실험에 사용한 영상 정합 알고리즘은 인공위성 연구센터에서 자체 개발하여 SPOT위성영상에 성공적으로 적용한 바 있는 정합 알고리즘을 사용하였다.

본 실험은 128Mbytes의 메모리와 CPU의 clock 속도가 175MHz인 MIPS R10000 SGI-IRIX워크스테이션에서 수행하였으며 결과는 Table 4에 나와

있다. 정합점의 개수를 살펴보면 SPOT이 가장 많으며 논산, 대전 순으로 정합점 수가 감소함을 알 수 있다. 이러한 현상은 각 영상의 스테레오 영역의 크기에 기인한다.

본 실험에서는 정합에 걸린 총시간을 정합점수로 나누어 하나의 정합점쌍이 생성되는데 걸린 시간을 측정하였다. 그 결과 ON모델에 기인한 정합보다는 DLT모델을 이용한 정합의 속도가 높았으며 SPOT과 EOC간의 정합속도에는 큰 차이가 없음을 확인할 수 있었다.

Table 4에는 각각의 카메라 모델을 적용하여 생성한 EOC DEM과 SPOT DEM을 USGS DTED와 비교하였으며 그 결과 EOC DEM이 SPOT DEM보다 더 좋은 정확도를 가지는 것으로 나왔다. 이는 EOC영상의 해상도가 6.6m 이고 SPOT영상의 해상도가 10m임을 고려할 경우 EOC DEM은 약 1~2픽셀 정도의 오차를 가지며 SPOT DEM은 약 3픽셀 이상의 오차를 보이는 것이다.

그러나 EOC 영상은 입체 영상을 취득한 시기가 3일에서 7일 사이로 좌우 영상이 거의 동일한 지표특성을 가지나 SPOT영상의 경우 촬영 일이 한 달 이상 차이가 나고 계절적으로 추수가 끝난 시기라 지표면 특성이 매우 다르게 나타나는 현상이

Table 4. Stereo matching results and DEM accuracy from each stereo pairs.

Sensor	KOMPSAT-1 EOC				SPOT	
	Daejeon		Nonsan		Daejeon and Nonsan	
Area	ON-EpiMatch	DLT-EpiMatch	ON-EpiMatch	DLT-EpiMatch	ON-EpiMatch	DLT-EpiMatch
DEM Extraction Method						
No. of Match Points	281,977	286,114	562,442	527,347	3,225,046	2,961,520
Match Speed(msec/point)	1.03msec	0.924msec	1.05msec	0.982msec	1.09msec	1.04msec
DEM Average Error	-0.55m	0.31m	2.38m	2.62m	-1.28m	-5.78m
DEM RMS. Error	12.85m	12.08m	8.82m	9.86m	31.99m	38.88m

있어 이것이 SPOT DEM의 정확도를 다소 저하시켰다. 참고로 이전 연구에서는 본 논문의 실험에서 사용한 알고리즘을 이용하여 SPOT영상으로부터 생성한 DEM의 정확도가 2~2.5픽셀 수준으로 보고한 바 있다(Lee *et al.*, 1999; Park *et al.*, 2000)

각각의 모델링 방법을 사용하여 생성한 DEM은 다음 Fig 3과 같다. 생성한 DEM의 격자간격은 EOC의 경우 10m, SPOT인 경우 20m로 리샘플링(resampling)하여 화면출력을 수행하였다. Fig 3(e), (f)의 실선은 EOC영상에서 생성한 DEM의 영역을 SPOT DEM에 표시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 대전지역의 경우 대청호의 모습을 오른쪽 상단에서 확인할 수 있으며 평지에서 USGS DTED와 달리 건물등에 의한 굴곡이 있음

을 확인할 수 있었다²⁾. 육안으로 DEM의 성능을 판별하기는 무리가 있으나 산동성이, 계곡, 구릉지대, 호수지역 등이 모두 올바르게 나타났음을 확인할 수 있다.

또한 EOC영상은 Ascending 궤도로 영상을 촬영하는 특성이 있어 EOC DEM이 왼쪽으로 기울어져 있으며, SPOT영상은 Descending 궤도로 영상을 촬영하므로 SPOT DEM이 오른쪽으로 기울어져 있음을 확인할 수 있다.

2) EOC DEM과 SPOT DEM의 정확도 분석시, 건물등에 의한 굴곡은 에러로 처리되었다. 따라서 본 논문에서 생성한 EOC DEM과 SPOT DEM은 DTED와의 비교로 분석된 정확도보다 더 정확할 가능성이 있음을 밝힌다.

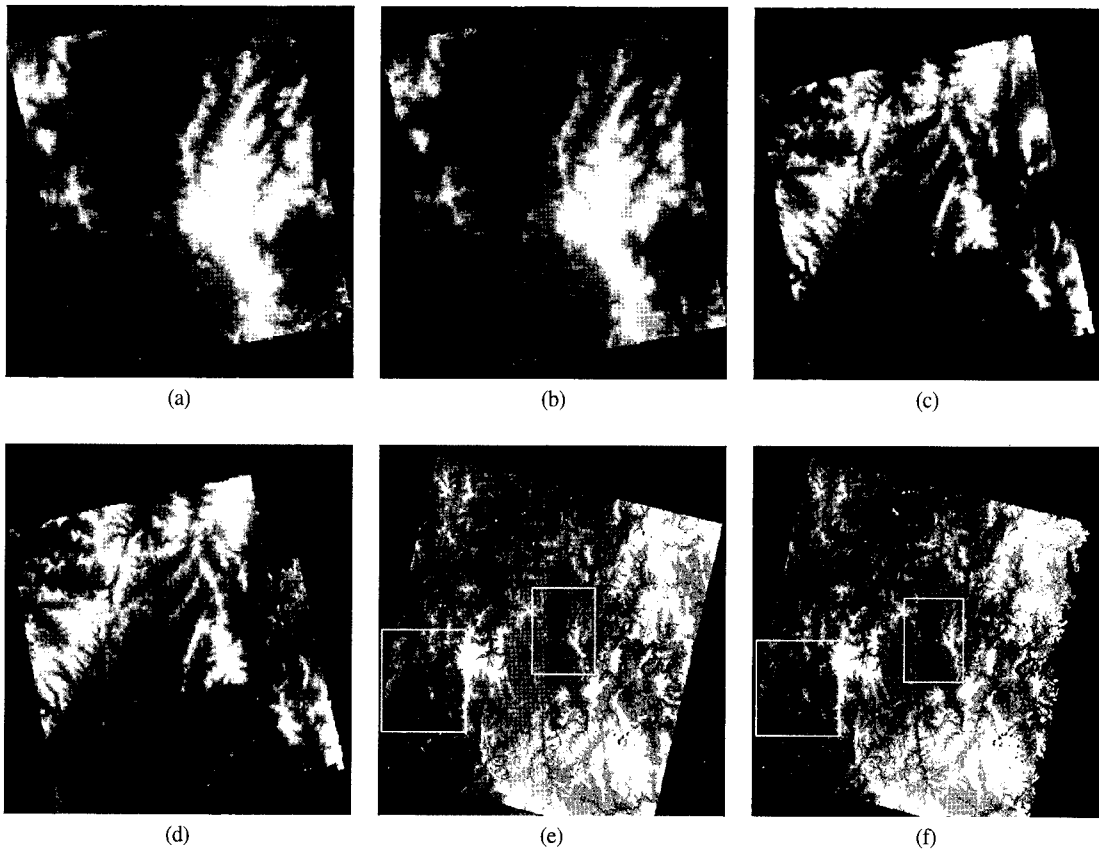


Fig. 3. DEMs generated from each stereo matching for each test area. (a) DEM from EOC Daejeon by ON-EpiMatch, (b) DEM from EOC Daejeon by DLT- EpiMatch, (c) DEM from EOC Nonsan by ON- EpiMatch, (d) DEM from EOC Nonsan by DLT- EpiMatch, (e) DEM from SPOT by ON- EpiMatch, (f) DEM from SPOT by DLT- EpiMatch.

5. 결론

본 연구에서는 EOC입체 영상을 이용하여 DEM을 생성하였으며 그 결과를 분석하기 위해 크게 카메라 모델링 과정과 영상 정합 과정으로 구분하여 논의하였다. EOC영상에 ON모델과 DLT 모델의 적용 가능성을 확인하기 위해 SPOT의 카메라 모델링의 경우와 비교하였으며, 영상 정합 단계에서는 EOC DEM과 SPOT DEM의 성능분석을 수행하였다. 또한 EOC DEM과 SPOT DEM의 결과를 정량적으로 확인하기 위해 USGS DTED를 사용하여 정확도 분석을 수행하였다.

EOC영상에 ON모델과 DLT모델을 적용한 결과 카메라 모델의 RMS 오차가 1픽셀 이하였으며 SPOT영상의 카메라 모델링 결과와 매우 유사함을 확인할 수 있었다. 또한 EOC영상에 절대표정의 정확도를 실험한 결과 EOC영상과 SPOT영상이 큰 차이가 없었으며 RMS오차가 1픽셀 이하임을 확인했다. 이는 ON모델과 DLT모델을 EOC영상에 적용할 수 있음을 보여준다.

그리고 대전과 논산지역 EOC DEM과 SPOT DEM을 USGS DTED와 비교한 결과 대전 EOC DEM이 약 12m, 논산 EOC DEM이 약 9m이며 SPOT DEM이 약 31m의 RMS오차가 있음을 확인했으며 EOC DEM이 SPOT DEM에 비해 정확도가 좋거나 성능이 우수한 것을 확인할 수 있었다.

사 사

대전지역 EOC위성영상과 지상 기준점 자료를 제공해준 한국항공우주연구원의 도움에 감사드립니다.

참고문헌

- 김태정, 이흥규, 1997. 위성영상으로부터 수치표고 모형 추출을 위한 새로운 정합구역의 비선형 최소자승 영상정합 알고리즘 개발, 대한원격탐사학회지, 13(2): 121-132.
- 김태정, 김승범, 신동석, 2000. 대표적 위성영상 카메라 모델링 알고리즘들의 비교연구, 대한원격탐사학회지, 16(1): 73-86.
- Gupta, R. G., and R. I. Hartley, 1997. Linear pushbroom cameras, *IEEE Trans. PAMI*, 19(9): 963-975.
- Kim, T. J., 2000. A Study on the epipolarity of linear pushbroom images, *PE&RS*, 66(8): 961-966.
- Kim, T. J., D. S. Shin, and Y. R. Lee, 2001. Development of a robust algorithm for transformation of a 3D object point onto a 2D image point for linear pushbroom imagery, *PE&RS*, 67(4): 449-452.
- Lee, H. Y., W. Park, S. A. B Kim, T. J. Kim, T. H. Yoon, D. S. Shin, and H. G. Lee, 1999. Satellite image processing software for value-added products, *Korean Remote Sensing Journal*, 15(4): 339-348.
- Orun, A. B., and K. Natarajan, 1994. A modified bundle adjustment software for SPOT imagery and photography: Tradeoff, *PE&RS*, 60(12): 1431-1437.
- Park, W., H. Lee, S. A. B Kim, T. J. Kim, T. H. Yoon, T-G Kim, 2000. Development of DEM generation software from satellite imagery, (CD-ROM) Proceedings of ASPRS 2000 Annual Conference, Washington