

## 선형 CCD카메라 영상의 정사투영 알고리즘 개발

곽성희\* · 이영란\* · 신동석\* · 김탁곤\*\*

한국과학기술원 인공위성연구센터 원격탐사연구실 시스템개발팀\*, 한국과학기술원 전기 및 전자공학과\*\*

### Ortho-rectification of Satellite-based Linear Pushbroom-type CCD Camera Images

Sung-Hee Kwak\*, Young-Ran Lee\*, Dong-Seok Shin\*, and Tag-Gon Kim\*\*

System Development Team, Remote Sensing Division, SaTReC, KAIST\*,

Dept. of Electrical and Electronic Engineering, KAIST\*\*

**Abstract :** In this paper, we introduce an algorithm for the ortho-rectification of high resolution pushbroom-type satellite images. The generation of ortho-images is the ultimate level of the satellite image preprocessing which also includes systematic geocoding and precision geocoding. It is also essential for the mapping of satellite images because topographic maps are based on the orthographic projection. The newly developed ortho-image generation algorithm introduced in this paper is on the line of the algorithms previously developed (Shin and Lee, 1997; Shin et al., 1998). Various experimental results are shown in this paper. The results show that the algorithm completely eliminates the disparities in the perspective viewed images which were caused by the terrain height. The absolute accuracy of the developed algorithm depends on the accuracy of the camera model and the digital elevation model used.

**Key Words :** ortho-rectification, terrain height, digital elevation model

**요약 :** 본 논문에서는 pushbroom 형태의 선형 CCD 카메라로부터 촬영한 고해상도 위성 영상의 정사투영 알고리즘을 소개한다. 정사투영은 조기기하학적보정, 정밀기하학적보정에 이은 위성 영상 전처리의 최종단계이며 정사투영법을 사용하는 정밀 지형도 제작을 위해 반드시 필요하다. 정사투영 영상을 생성하기 위해 카메라 모델은 기존에 본 학회지에 소개된 바 있는 카메라 모델 및 resampling 알고리즘(신동석, 이영란, 1997), 정밀카메라모델 결정 알고리즘(신동석 외, 1998)을 사용하였고 지형의 DTM 데이터를 이용하여 알고리즘을 개발하였다. 여러 가지 실험 결과에서도 볼 수 있듯이 개발된 정사투영 알고리즘은 투시법(perspective projection)을 사용한 영상에서 지표의 고도에 따른 시차를 정확히 제거한다. 그리고 정사투영의 최종 절대 정확도는 정밀카메라모델을 생성하기 위해 사용된 GCP(Ground Control Point)의 정확도 및 사용되는 수치표고 데이터의 정확도에 의존함에도 유의해야 한다.

**주요어 :** 정사보정, 지표고도, 수치표고모델

## I. 서론

인간의 눈, 카메라 등이 3차원의 대상을 2차원 영상에 투영시키기 위해서는 일반적으로 하나의 초점을 중심으로 투영시키는 투시법(perspective projection)을 사용한다. 이러한 투시법의 사용은 초점과 대상간의 거리에 따라 대상의 투영위치가 달라지므로 대상의 원근을 파악하는데 중요한 정보를 제공한다. 또한 인간이 3차원 대상을 인식하는 방법도 이와 같으므로, 투시법을 사용하여 투영시킨 사진, 그림 등은 매우 현실감있게 느껴진다.

하지만 지형도의 제작에 있어서는 이러한 투시법이 아닌 정사투영(또는 평행투영)법을 사용한다. 즉 3차원 지형이 하나의 초점으로 모여서 투영되는 것이 아니고 지형의 넓이와 같은 크기의 거울에 그대로 비추는 형태로 투영된다. 대신 지형의 3차원 정보(높이정보)는 정사 투영된 2차원 좌표 상에 높이에 해당되는 등고선을 그림으로써 표현한다. 지형도의 정사투영 및 등고선을 사용한 3차원 표현방법은 인간이 인식하는 투시법과는 많이 다르므로 다소 생소할수 있으나 지상의 대상을 높이와 관계없이 정확한 수평위치에 표기하기 위해서 불가피하게 선택된 방법이라고 할 수 있겠다. 따라서 투시법으로 촬영하는 항공영상 또는 위성 영상을 사용하여 정밀 지도를 제작할 때에는 영상의 정확한 카메라모델 형성과 이에 따른 보정과정 뿐만 아니라, 지형의 높이에 따른 투영위치를 정사 투영에 맞게 보정해 주는 것이 필수적이다.

Figure 1은 지형의 높이에 따른 정사투영 오차를 보여 준다. P는 투시법에 의해 영상 내에서 P2에 해당되는 위치로 투영되지만 실제 지형도 제작

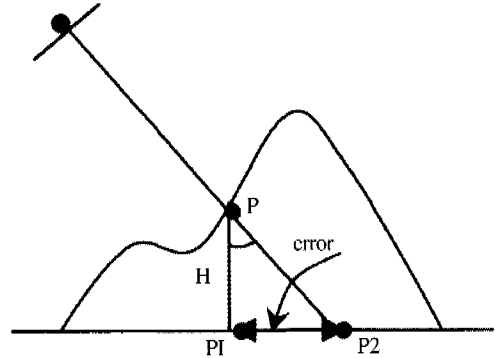


Fig. 1. Terrain height effect in perspective projection.

시 사용되는 정사투영법에 의하면 P1에 해당되는 위치로 투영되어야 한다. 이러한 P1과 P2와의 오차는 지표면의 높이, 촬영각등에 의존하게 된다. Table 1은 실제 오차의 정도를 보여주는 예로서 KITSAT-3의 경우 지표면의 높이 H가 2000 m, Field of view가 3.7°일 때 P1과 P2 사이의 오차는 64 m 정도이고 영상의 resolution 13.5 m를 고려하면 4.74 pixel정도 벗어나게 된다. 이 때 tilting을 수행하여 촬영각이 커지면 이러한 오차는 더욱 커지게 된다.

본 연구개발의 선행단계로서 고해상도 선형 CCD 카메라 영상의 전처리를 위한 카메라모델 및 초기기하학적 보정 알고리즘(신동석, 이영란, 1997), 정밀 카메라모델 결정 및 정밀 기하학적 보정 알고리즘(신동석 외, 1998)을 개발, 발표하였다. 이러한 알고리즘을 기초로 하여 전처리의 마지막 단계이며 지도제작에 반드시 필요한 정사투영영상 생성 알고리즘을 소개한다.

Table 1. Examples of terrain height effect.

위성/센서	Field of view	Resolution	최대 오차 (H = 2000 m)	
			Ground (m)	Pixel
KITSAT-3/MEIS	3.7°	13.5 m	64	4.74
SPOT/PAN	4.13°	10 m	72	7.2
JERS-1/VNIR	7.55°	18 m	132	7.4

## II. 정사보정 알고리즘 개요

현재까지 개발된 영상보정 알고리즘과 새로이 추가 개발된 정사보정 알고리즘을 간단히 설명하면 다음과 같다.

▶ 초기기하학적보정 : 위성, 센서, 궤도, 지구 등을 수학적으로 모델링하여 영상내의 각 화소가 지도에 투영되는 좌표를 구하는 방법 (신동석, 이영란, 1997)이다. 제안된 방법은 Figure 2와 같이 영상 좌표계로부터 지도 좌표계로의 정함수 변환과 그 역으로 지도 좌표계로부터 영상 좌표계로의 역함수 변환이 있고 그 과정은 Figure 3과 같다.

▶ 정밀기하학적보정 : 기준지도와 원시영상간



Fig. 2. Coordinate systems for forward transformation.

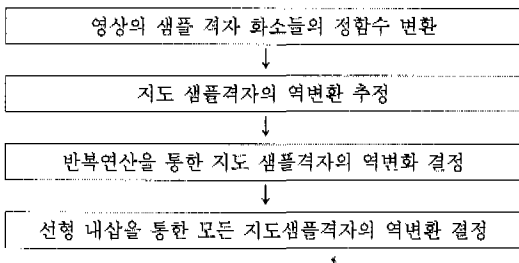


Fig. 3. Inverse transformation process.

의 동일제어점(GCP)을 추출, 이를 이용하여 정밀 카메라 모델을 구하고 원시영상을 지도 좌표계로 투영하는 방법(신동석 외, 1998)이다.

▶ 정사투영 : 정밀기하학적보정 방법에 지표 고도 정보, 즉 DEM(Digital Elevation Model)을 추가하여 참조할 영상 좌표계의 좌표를 구하는 방법으로 Figure 4는 이러한 보정과정을 보여준다.

먼저 초기보정만을 수행하려 하면 주어지는 위성궤도 및 자세 보조정보(*a priori* auxiliary information: ephemeris and attitude)를 카메라모델에 대입하고, 이러한 카메라 모델을 사용하여 영상을 보정한다. 이 경우 주어지는 보조정보의 부정확성에 의해서 수백미터의 지상 위치 오차가 발생한다 (신동석, 이영란, 1997). GCP를 사용하는 정밀보정에서는 필요한 GCP의 개수, 분포도, 오차에 대한 민감도, 최종 카메라모델 오차 등은 알고리즘에 매우 의존적이다. 이에 물리적 카메라모델과 칼만필터를 사용하여 최적의 정밀카메라모델 획득 알고리즘을 개발하였고(신동석 외, 1998) 정확한 3-4개의 GCP를 사용하면 부화소 단위의 영상 정밀보정이 가능하다.

본 논문에서 제안되는 정사투영영상 생성 알고리즘은 기존의 카메라모델 및 resampling 알고리즘을 그대로 사용하며, GCP를 사용하여 정밀카메라모델의 획득이 이루어진 후에 수행된다. 즉 정밀 카메라모델을 획득한 후 DEM 정보를 사용하지 않으면 기존의 정밀보정이 되는 것이고 DEM 정보를 사용하여 정사투영을 시키면 정사보정이 되

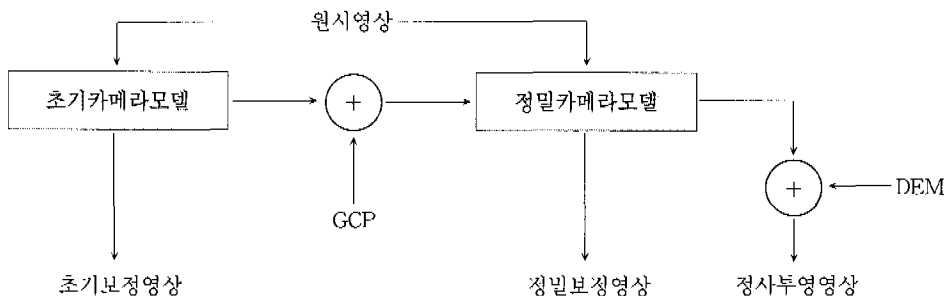


Fig. 4. Image correction procedure.

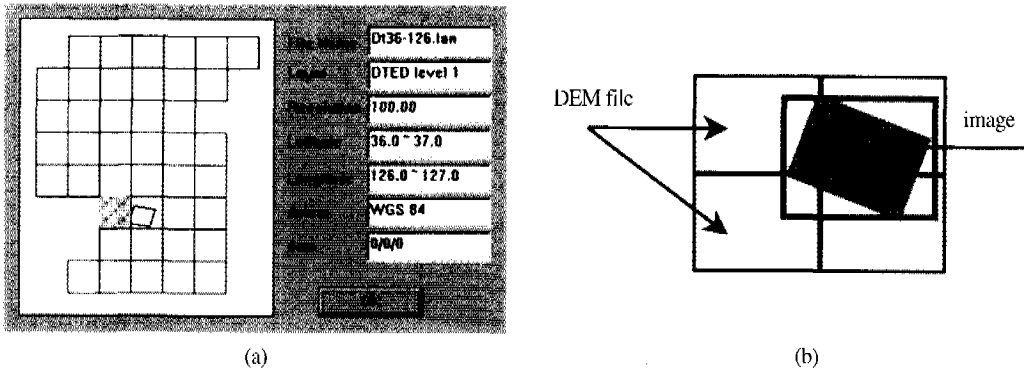


Fig. 5. DTED level 1 database in KIMS3.

는 것이다. 따라서 본 논문에서는 기존에 발표되었던 카메라모델, 정밀카메라모델 획득 알고리즘, 정변환/역변환 알고리즘에 대해서는 생략하고, 이러한 알고리즘을 이용하여 정사보정을 수행하기 위해 새로 추가 개발된 알고리즘에 대해서만 자세히 기술하도록 한다. 기존의 알고리즘들은 참고문헌(신동석, 이영란, 1997) 및 (신동석 외, 1998)을 참고하는 것을 권한다. 또한 현재까지 개발된 모든 알고리즘은 우리별 3호 영상 및 다른 고해상도 위성영상(SPOT/PAN, XS, JERS-1/OPS 등)의 전처리 보정 소프트웨어인 KIMS3 (KITSAT-3 Image Mosaic System)에 통합 구현되어 운영레벨의 영상처리가 이루어지고 있다.

### III. 정사투영영상 생성 알고리즘 개발

#### 1. DEM 데이터베이스

정사보정을 위해서 적용된 DEM으로는 NIMA (National Imagery and Mapping Agency)에서 제공하는 한반도 전역에 해당되는 DTED level 1 데이터를 사용하였다. DTED level 1 데이터는 경위도 1도 범위의 표고값을 하나의 라스터 파일 형태로 가지고 있으며, 한 파일은 1201×1201화소로 구성되어 있어서 해상도 3초의 경위도 좌표에 해당되는 표고값을 제공한다. 경위도 투영 시 기준 타원체 및 데이터으로는 WGS-84가 사용되었고,

표고의 기준은 평균해수면 즉 지오이드 기준이다. 이러한 한반도 전역의 DTED 데이터에 대한 정보는 KIMS3에 데이터베이스화 되었고 각 파일의 구성을 간단히 보면 Figure 5(a)와 같다. 원시영상의 4개 구석점에 해당되는 지상좌표를 정밀카메라모델로 계산하여 그 경계에 포함되는 영역의 DEM 데이터를 읽어들이나 (Figure 5(b)).

3초 간격은 지상에서 70~90m 정도의 해상도를 가지고 있으므로 실제로 10m 내외의 고해상도 위성영상의 정사 보정용 DEM으로는 부적합하다. KIMS3는 한반도 전역 영상을 운영레벨에서 전처리하기 위해 개발되었고, 현재 이를 만족시키는 가장 좋은 해상도 DEM 데이터로서 DTED level 1을 선택하게 되었다. 하지만 KIMS3에는 DEM 데이터를 layer별로 저장하고 데이터베이스화 할 수 있는 기능이 구현되어 있으므로 다른 고해상도 DEM데이터를 KIMS3에 간단히 추가할 수 있다. DTED level 1의 해상도에 따른 높이 오차에 대한 실험결과는 4장에서 기술하도록 한다.

#### 2. DEM을 사용한 역함수 변환

Resampling을 수행시 영상 좌표계에서 지도 좌표계의 정함수 변환은 영상 좌표계의 모든 행, 열 좌표를 정함수로 변환시켜 저장한 후 지도 좌표계의 격자 화소 밝기값을 구해야 하는 등의 단점을 가지고 있으므로 지도 좌표계에서 영상 좌표

1) 인접 파일의 경계에서 1줄씩 쉼튼 데이터를 포함.

계로의 역함수 변환을 수행한다(신동석, 이영란, 1997). 역함수 변환 과정을 위의 Figure 3과 같고 정사투영 영상을 생성하기 위해서는 이러한 과정 중에 두번째에 해당되는 모듈에서 지상좌표에 표고값을 적용해야 한다. 먼저 지도 좌표계의 격자에 해당되는 표고값을 구하는 것은 다음의 3단계로 나누어 진다.

1) 지도좌표를 DEM 참조 좌표로 변환

최종 투영이 될 지도좌표(target coordinate)에서 사용되는 기준타원체와 데이텀(current ellipsoid, current datum)은 DEM 데이터에서 사용한 것(WGS84)과 다를 수 있으므로 현재 지도 좌표계 상에서의 경위도 값을 가지고 해당 위치의 높이값을 가져오려면 DEM 파일에서 참조할 경위도 값으로 변경해야 한다. 이 과정을 도식화하여 표현하면 Figure 6과 같다.

먼저 지도 좌표계에 해당되는 평면 좌표를 경위도 좌표(lat, long)로 바꾸고 이를 현재 사용 중인 기준타원체를 사용하여 직교 좌표(X, Y, Z)로 변환시킨다. 이를 현재 사용중인 데이텀 상수를 사용하여 지심좌표(ECR)로 변환시킨 후 DEM의 타원체 및 데이텀을 사용하여 다시 역으로 변환하여 DEM 기준 좌표에 맞는 새로운 경위도(lat', long')을 구한다. KIMS3에서는 데이텀 변환, 즉 직교 좌표계와 지심 좌표계 간의 변환을 위해 3변수 변환을 사용한다 (Dana, 1997). 이는 3차원 좌

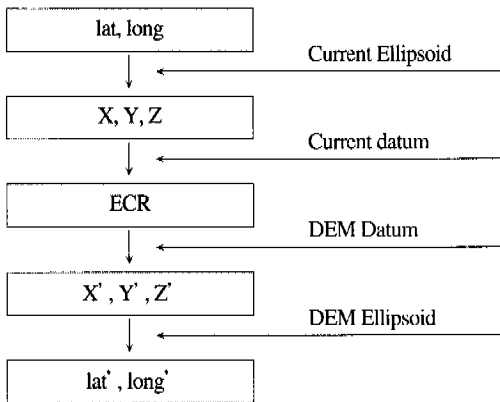


Fig. 6. Lat/long coordinate conversion according to datum.

표들에 대하여 원점이동(Δx, Δy, Δz), 회전요소(ω, θ, χ), 축적요소(λ)의 7변수를 사용하는 변환법이(유복모, 1995) - 원점이동, 축적변화와 원점을 중심으로 회전이동을 하는 Bursa-Wolf방법과 변환 계수간의 상관 계수가 커진다는 단점을 극복하기 위해 다른 회전 원점을 사용하는 Molodensky-Badekas방법 등 - 지심 좌표계를 사용하는 위성영상의 카메라모델에서는 사용될 수 없기 때문이다. 따라서 실제 실험에서는 3변수 변환에 의한 오차를 제거하기 위해 current ellipsoid 및 current datum을 모두 DEM 기준과 같은 WGS84로 하였다.

2) 높이값 선형 보간

지도좌표에 해당되는 DEM 경위도가 결정되면 그 경위도 주위의 4점 높이를 bilinear보간법을 사용하여 결정한다.

3) Geoid와 타원체 기준 높이 보정

앞서 설명되었듯이 DEM 데이터는 평균해수면(지오이드)을 기준으로 한 높이이며, 이를 지심좌표계를 사용하는 위성 카메라모델에 적용하기 위해서는 타원체 기준높이로 변환하여야 한다. 지오이드는 지구 전체로 볼 때 기준 타원체와는 100 m까지 벗어날 수 있다. 따라서 미국의 NIMA에서 1987년에 발표한 WGS84 기준 타원체와 지오이드와의 높이 편차 데이터(경위도 10도 격자의 테이블로 발표한 내용(Dana, 1997))를 참고로 하여 지오이드 높이를 구하는 모듈을 구현하였다. 즉 DEM의 높이에 지오이드 높이를 더하여 타원체 기준 높이로 사용한다 (Figure 7).

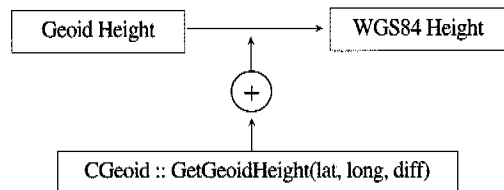


Fig. 7. Conversion from geoid-based height to WGS84-based height.

이렇게 해서 구해진 높이와 지도좌표(target coordinate)의 경위도를 사용하여 새로운 직교좌표를 생성하고 (Dana, 1997) 이를 이용하여 역함수 변환을 수행한다 (신동석, 이영란, 1997). 정사 보정의 특성상, 지도 좌표계의 매 격자 좌표마다 그에 해당되는 높이를 구하여 역함수변환을 수행해야 하기 때문에 선형 보간법을 이용할 수 있는 초기 보정이나 정밀 보정에 비해서 (신동석, 이영란, 1997) 상당한 수행시간이 요구된다. 실제로 SPOT/PAN 6000×6000 영상을 매 화소마다 정사투영을 시켰을 때 PentiumII 350MHz 플랫폼에서 약 1시간반 정도가 소요되었다.

#### IV. 실험 결과

##### 1. 사용영상 및 GCP

본 논문에서는 실험영상으로서 SPOT/PAN (지상 해상도 10 m, 6000×6000) 영상을 사용하였다. 정사투영의 효과를 보기 위해서 촬영 각도는 15.1°이며 고도 0~1000 m의 평지와 산지가 공존

하는 지역을 선택하였다 (K/J = 308/278), 60 km × 60 km 전체 영상 중에서 약 45 km × 30 km의 영역(N 36°00' ~ 36°15', E 128°30' ~ 129°00')에서 GCP를 25개 추출하였다. GCP의 지상좌표는 DGPS (Differential Global Positioning System)을 사용하여 수십 cm 이내로 결정하였으며 GCP의 영상좌표의 결정은 현실적으로 약 1화소 (10 m) 정도의 오차를 가질 수 있다. 사용된 영상, 추출된 GCP의 분포는 Figure 8과 같다.

##### 2. 정밀 카메라모델 결정

추출된 25개의 GCP를 이용하여 정밀 카메라모델을 결정하였고 (신동석 외, 1998) 그 결과는 Figure 9과 같다. (신동석 외, 1998)에서 실험한 방법과 같이 n개의 GCP를 보정에 사용하고 나머지 25-n개의 GCP를 check point로 사용하였다. Figure 9에서는 n이 1에서 25까지 증가함에 따라 check point들의 평균오차가 어떻게 변하는 지를 보여준다.

Figure 9에서 보는 바와 같이 초기오차(475 m)는 GCP 2-3개를 사용함으로써 최종오차인 10 m(1화소)로 줄일 수 있다. 이는 (신동석 외, 1998)

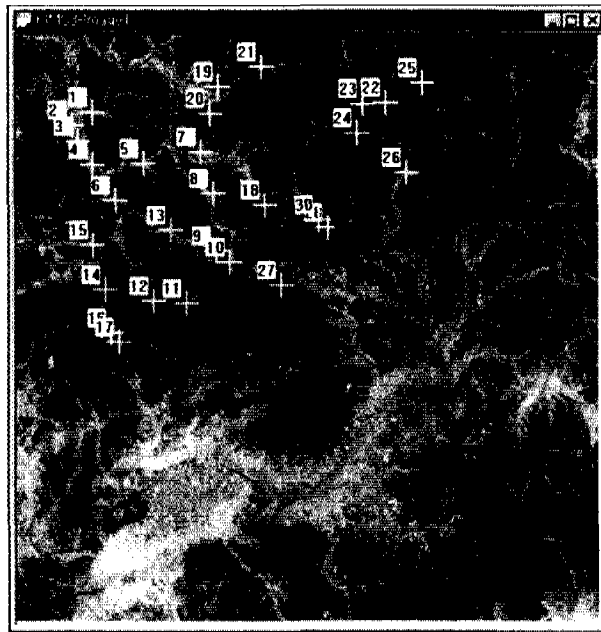


Fig. 8. Test image and GCP distribution.

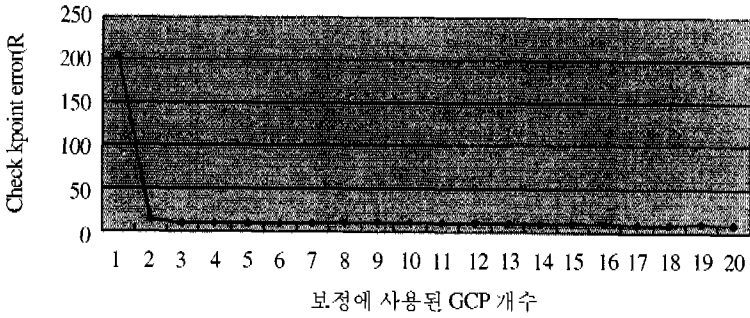


Fig. 9. Precision camera model error. (check point only)

에서 보여진 약 40 m의 최종오차가 1:50,000지형도의 오차에서 기인한다는 것을 잘 보여준다.

### 3. DEM 데이터 오차 분석

3장 1절에서 설명한 바와 같이 70~90 m해상도의 DEM 데이터를 사용하여 bilinear보간법으로 높이값을 추출하는 것은 그 사이의 표고변화에 따른 높이 오차를 생성할 수 있다. 이 영향을 분석하기 위해 DGPS로 측량된 GCP 25개의 경위도에 해당되는 DTED DEM 높이와 실제 측량된 높이와의 차이를 구하였고, 그 결과 최대 43 m, 평균 11.3 m의 높이 오차를 얻었다. 대전 지역(고도 0~300 m)의 DGPS 측량 GCP 약 30여개를 사용하였을 때는 최대 15 m, 평균 5.6 m의 높이 오차를 얻은 것으로 미루어 볼 때, 경사의 공간적 기복이 심한 산악지역에서 DTED DEM의 저해상도에 따른 오차가 더 심하다는 것을 증명할 수 있었다. 최대 높이 오차 43 m가 미치는 최대 지상오차는 다음과 같이 계산될 수 있다 :  $43 \times \tan(15.1 + 4.13/2) = 13.28$  m (tilting angle = 15.1°, FOV = 4.13°). 일단 본 논문의 실험에서는 DTED level 1 DEM의 데이터가 정확한 표고를 가지고 있다고 가정하였으며 추후에 더 정확한 DEM 데이터를 획득한 후 절대 오차 비교실험을 수행할 예정이다.

### 4. 정사보정과 정밀보정의 오차 분석

정사보정의 효과를 분석하기 위해서 다음과 같은 실험을 수행하였다 (Figure 10). 25개 GCP 경

위도에 DEM 데이터를 반영시킨 직교좌표(정사보정)와 반영하지 않은 직교좌표(정밀보정)를 각각 정밀카메라모델을 사용하여 역변환 시켜서 얻은 영상좌표의 행, 열 값과 본래 GCP 영상좌표의 행, 열 값을 비교하였다. Figure 11는 그 결과 오차의 패턴을 보여 준다.

Figure 11의 그래프에서 column축은 GCP의 영상 내 행좌표(화소단위), height축은 GCP의 높이(미터단위), Z축은 오차(화소단위)를 뜻한다. 그림에서 보는 바와 같이 정밀보정 결과(■)는 GCP의 높이에 의해서 큰 오차를 보이며 그 오차는 GCP의 높이가 커질수록 증가된다. 하지만 정사보정

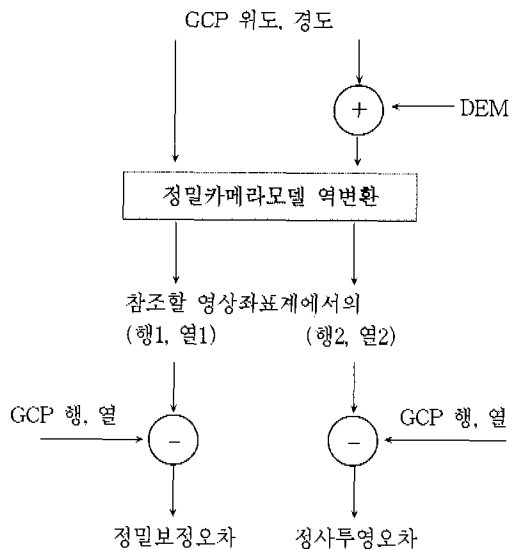


Fig. 10. Test procedure : effect of ortho-rectification.

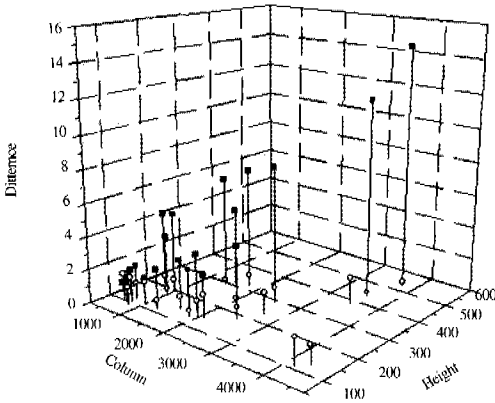


Fig. 11. Results : precision correction vs ortho-rectification.

(○)은 이러한 높이 값에 의한 수평오차를 없앴기 때문에 GCP의 높이와 관계없이 평균 약 1화소의 잔여오차만을 가진다. 결과적으로 정밀보정 및 정사보정의 결과오차(RMS)는 각각 41.8 m, 9.8 m이다. 정사보정의 10 m내외의 잔여오차는 본장의 2절에 기술된 정밀카메라모델 결정 시의 잔여오차를 그대로 안고있는 경우이며 따라서 개발된 정사보정 알고리즘이 DEM 데이터를 사용하여 정확하게 지표 높이에 시차를 제거한다고 할 수 있다.

## V. 결론 및 토의

본 논문에서는 고해상도 위성 영상의 정사투영 알고리즘에 대하여 기술하였다. 개발된 알고리즘은 투시법을 사용하여 얻어진 위성영상을 사용하여 지도 및 기준 수평영상을 제작할 때 반드시 필요한 것으로 본 알고리즘은 수십개의 GCP를 사용하여 여러 가지 실험의 결과 그 정확도가 검증되었다. 실험 시 발생한 오차는 정밀카메라모델 결정 시 발생하는 잔여오차를 제외하면 지표 높이에 의한 시차를 정확히 제거함을 알 수 있다. 따라서 정확한 정사투영영상을 생성하기 위해서는 우선적으로 정확한 정밀카메라모델을 생성이 요구되어지고 아울러 DEM 데이터의 정확성도 중요한 사항 중 하나이다.

## References

- 신동석, 이영란, 1997. 선형 CCD 카메라 영상의 기하학적 모델 수립 및 좌표 변환, 대한원격탐사학회지, 13(2):85-98
- 신동석, 이영란, 이홍규, 1998. 선형 CCD 카메라 영상의 정밀 기하학적 보정, 대한원격탐사학회지, 14(2):137-148
- 유복모, 1995. 측량학 원론 (1), pp.152-154
- Dana, P.H., 1997. Geodetic Datum Overview, <http://wwwhost.cc.utexas.edu/ftp/pub/grg/notes/datum>
- NIMA, Performance specification Digital Terrain Elevation Data (MIL-PRF-89020A)
- Lee, L.-H., L.-C. Chen, 1993. Rigorous Generation of Digital Orthophotos from SPOT Images, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 59:(50)655-661
- Alrousan, N., Cheng, P., Petric, G., Toutin, T. and Zoej, M.J.V, 1997. Automated DEM extraction and orthoimage generation from SPOT Level 1B imagery, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 63:(8)965-974
- Thilak Senanayake, M. P. M.Sameeu, S. Munaweera, 1997. Digital Orthophoto Rectification, Proceedings of the 18th Asian Conference on Remote Sensing
- Chang, D., J. Liu, Y. Jiang, and H. Li, 1990. Geometric correction with photographic model for satellite remote sensing images, SPIE Digital Image Processing Visual Communications Technology, Earth Atmospheric Science, 8(4):162-171
- Shin, D., J. K. Pollard, and J-P Muller, 1997. Accurate Geometric Correction of ATSR Images, IEEE T. Geoscience and Remote Sensing, 35:(4)997-1006