KOMPSAT-2 입체영상의 자동 기하 보정

오관영 · 정형섭[†]

서울시립대학교 공간정보공학과

Automatic Geometric Calibration of KOMPSAT-2 Stereo Pair Data

Kwan-Young Oh and Hyung-Sup Jung[†]

Department of Geoinformatics, The University of Seoul

Abstract : A high resolution satellite imagery such as KOMPSAT-2 includes a material containing rational polynomial coefficient (RPC) for three-dimensional geopositioning. However, image geometries which are calculated from the RPC must have inevitable systematic errors. Thus, it is necessary to correct systematic errors of the RPC using several ground control points (GCPs). In this paper, we propose an efficient method for automatic correction of image geometries using tie points of a stereo pair and the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Digital Elevation Model (DEM) without GCPs. This method includes four steps: 1) tie points extraction, 2) determination of the ground coordinates of the tie points, 3) refinement of the ground coordinates using SRTM DEM, and 4) RPC adjustment model parameter estimation. We validate the performance of the proposed method using KOMPSAT-2 stereo pair. The root mean square errors (RMSE) achieved from check points (CPs) were about 3.55 m, 9.70 m and 3.58 m in X, Y, and Z directions. This means that we can automatically correct the systematic error of RPC using SRTM DEM.

Key Words : 3D geopositioning, KOMPSAT-2, SRTM DEM, RPC

요약 : KOMPSAT-2와 같은 고해상 위성영상은 대상영역의 3차원 위치결정을 위하여 RPC(Rational Polynomial Coefficient)가 포함된 자료를 제공한다. 그러나 RPC로 계산된 영상기하의 일정량의 편이(systematic errors)를 지니고 있는 상태이며, 이를 보정하기 위해서는 수 개 이상의 지상기준점(ground control point)이 필요하다. 이에 본 논문에서는 지상기준점 없이 입체영상(stereo pair)과 SRTM(Shuttle Radar Topography Mission) DEM(Digital Elevation Model) 사이의 대응점(tie point)만을 이용하여 자동으로 영상 기하를 보정하는 효과적인 방법을 제안하였다. 이러한 방법은 4가지 단계를 포함 한다: 1) 대응점 추출, 2) 대응점에 대한 지상좌표 결정, 3) SRTM DEM을 이용한 지상좌표의 보정, 4) RPC 보정 모델의 파라미터 결정. 우리는 KOMPSAT-2 입체영상을 이용하여 제안된 방법의 성과를 입증하였다. 검사점(check point)을 통해 계산된 RMSE(Root Mean Square Error)는 X와 Y, Z방향으로 각각 약 3.55 m, 9.70 m, 3.58 m를 나타냈다. 이는 SRTM DEM을 이용하여 RPC가 지닌 편이를 X, Y 및 Z 모든방향에 대하여 10 m이내의 정확도로 자동보정할 수 있다는 것을 의미한다.

접수일(2012년 3월 1일), 수정일(1차 : 2012년 3월 28일, 2차 : 4월 17일), 게재확정일(2012년 4월 20일).

[†] 교신저자: 정형섭(hsjung@uos.ac.kr)

1. 서론

KOMPSAT-2 위성영상은 영상좌표와 지상좌표간의 센서모델링(sensor modeling)을 위하여 RPC(Rational Polynomial Coefficient)가 포함된 자료를 제공한다. 그러나 RPC 모델은 기준점을 사용하지 않고, 위성의 궤도 정보와 카메라 모델에 대한 정보만으로 결정되기 때문에, 일정량의 오차를 포함한다. 특히, KOMPSAT-2 RPC의 수평위치오차는 약 115 m 까지 이르는 것으로 보고된 바 있다(오관영 등, 2011).

따라서 RPC로 계산된 위치정보가 지닌 오차를 제거하기 위한 다양한 형태의 보정 방법들이 개발되었다. 그러나 기 개발된 보정 방법들은 반드시 수 개 이상의 지상기준점(ground control point)이 전제되어야 한다는 기술적 한계를 넘지 못하고 있다. 일반적으로 지상기준점은 GPS(Global Positioning System) 장비를 이용한 직접 실측으로 획득된다. 그러나 현장을 방문해야 한다는 제약조건 때문에, 많은 시간과 비용이 소요되며, 북한과 같은 비 접근 지역에서는 실측 자체가 불가능하다.

이러한 이유로 지상기준점을 대체할 수 있는 다양한 연구들이 진행되었다. Kim and Im(2003)은 과거에 사용했던 지상기준점 chip을 보관하였다가 새로운 위성영상의 기하 보정을 위해 재사용하는 방법을 제안하였다. Lim *et al.*(2004)은 기하 보정이 되어있는 Landsat-7 영상에서 필요한 지상기준점을 추출하여, KOMPSAT-1의 왜곡된 기하를 보정하였다. SAR(Synthetic Aperture Radar), LiDAR(Light Detection And Ranging) 영상 등 다중센서자료를 이용한 보정 방법도 제안되었다. 대표적으로 SAR영상에 선형 패치(patch)를 적용하여 다중 특징 정보를 추출하고, 이들 간의 매칭을 통해 Landsat, SPOT 등의 기하 오차를 제거하는 방법이 개발되었다(Dare and Dowman, 2000; Zou *et al.*, 2003). 또한, Huang and Li(2010)은 의학 분야에서 주로 사용되는 shape context라는 새로운 특징 정보를 이용하여 매칭쌍을 추출하고, 중저해상의 광학영상과 SAR영상간의 기하 보정을 수행하였다. 국내의 경우, Jung *et al.*(2008)은 ERS SAR와 수치표고모델(digital elevation model)로부터 지상기준점을 추출하였고, SPOT 위성에 적용하였다. 한유경 등(2011)은 canny edge operator를 통해 추출된 선형정보를 이용

하여 고해상의 IKONOS영상과 SAR영상 간의 기하 보정을 수행하였다. Ebner *et al.*(1991)은 푸쉬부름 센서의 정밀 기하 보정을 위하여 DEM(Digital Elevation Model) 매칭 방법을 제안했고, 화성탐사선 Mars express에서 촬영된 영상에 적용되어 활용가능성을 입증했다(Heipke *et al.*, 2004). Gianinnetto and Scaioni(2008)은 이전의 방식을 개량하여 이미 정사 보정이 되어있는 위성영상과 DEM 세트에서 필요한 지상기준점을 추출하였으며, D' Angelo *et al.*(2009)은 CARTOSAT-1 RPC로 계산된 지상좌표를 보정하기 위하여 Landsat-7 영상과 DEM, DSM(Digital Surface Model) 정렬에 근거한 RPC 보정 방법을 사용하였다.

그러나 현재까지 진행된 연구들이 이미 기하 보정된 위성영상, SAR영상, LiDAR 자료, GCP(Ground Control Point) chip, 수치지도 등, 초기 고비용이 요구되는 데이터클립들이 전제되어야만 하고, SAR영상 등과 같은 다중센서자료를 이용할 경우 영상간의 좌표체계를 일치하기 위해서 일부 수동 작업이 포함되어야 하며, 처리 과정이 상대적으로 매우 복잡하다는 단점이 있다. 또한, 최종적으로 수행된 기하 보정의 정확도 역시 만족할만한 성과를 내지 못하고 있다.

이에 본 연구에서는 지상기준점에 대한 직접적인 실측 없이 USGS에서 무료로 제공하는 SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) DEM과 위성영상간의 대응점만을 이용해서, KOMPSAT-2 RPC가 지닌 오차를 제거하는 자동 기하 보정 방법을 고안하였다. 제안된 모델의 활용가능성을 입증하기 위하여 1쌍의 KOMPSAT-2 입체영상(stereo pair)을 이용하였고, GPS 실측으로 획득된 33개 검사점(check point)을 통해 최종적인 기하 보정 정확도를 분석하였다.

2. 연구 방법

본 연구에서는 KOMPSAT-2 입체영상과 SRTM DEM을 이용하여 정밀한 3차원 위치좌표를 결정하는 자동 기하 보정 방법을 개발하였다. 해당 알고리즘은 다음의 순서를 통하여 진행 된다(Fig. 1):

- 1) KOMPSAT-2 입체영상으로부터 대응점 추출

Fig. 1. Flow chart of automatic geometric calibration.

- 2) KOMPSAT-2 RPC를 이용한 대응점의 3차원 지상좌표 계산
- 3) SRTM DEM과 대응점사이의 cross-correlation을 이용한 대응점의 3차원 지상좌표 보정
- 4) RPC 보정 모델의 model parameters 결정

1) KOMPSAT-2 입체영상으로부터 대응점 추출

대응점의 추출은 입력된 입체영상에서 동일한 위치를 나타내는 점을 찾는 단계이다. 이러한 영상 매칭 기법은 수치사진측량분야에서 널리 알려진 과정이며, 일반적인 상용소프트웨어의 모듈로 탑재되어 이용되고 있다.

일반적으로 정확도가 가장 높은 영상 매칭 기법은 structural matching 기법(Wang, 1998)으로 알려져 있다. 그러나 상기 기법은 기존의 feature/area based method 등의 매칭 기법에 비하여 계산시간이 너무 오래 걸린다는 단점이 있다. 이를 보완하기 위한 방법으로 위성영상의 메타정보 등으로 수립된 초기센서모델을 이용하여 영상 피라미드를 구성하고, 이를 기반으로 feature point matching 기법과 least square matching 기법을 혼용한 새로운 매칭 방법이 개발되었다(Wang, 1999). 이러한 매칭 방법은 ERDAS 9.2에서 이용 가능하며, 초기 파라미터의 설정만을 제외하고, 모두 자동으로 진행된다(Wang, 1999; ERDAS, 2009). 본 연구에서는 Fig. 2와 같은 순서로 상기 알고리즘을

Fig. 2. Automatic extraction of tie points (modified from Wang, 1999).

적용하였다

상기 알고리즘 적용을 위한 첫 번째 단계는 초기 센서모델에 대한 수립이다. 초기 센서모델은 영상에서 제공하는 메타정보를 이용한 물리적 센서모델, RPC를 이용한 다항식 모델 등으로 구성할 수 있다. 본 연구에서는 위성영상과 함께 제공된 RPC 모델을 적용하였다.

영상 매칭의 시간을 줄이기 위한 방법으로 image pyramid를 이용한다. Image pyramid는 매칭에 사용될 영상의 크기를 줄이면서 해상도를 순차적으로 낮춘 영상이다. 이는 일반적으로 4개의 레벨을 가진 image pyramid 구조로 구성된다.

두 영상에 대한 대응 후보점 결정은 한 영상을 기준 영상으로 선택하고, 상기 선택한 영상에서 밝기 값이 변화가 상대적으로 큰 점으로 선택하게 된다. 관련된 알고리즘으로는 Moravec Operator, Dreschler Operator,

Förstner Operator 등이 널리 쓰이고 있으며, 본 연구에서는 Förstner Operator를 이용하였다(Förstner and Gülch, 1987; Lü, 1988).

기준영상에서 선택된 후보점과 대응하는 점을 찾는 feature matching을 위해서는 검색할 영역의 크기와 correlation 윈도우의 크기를 결정해야 한다. 실험에서는 초기 센서모델의 정확도를 고려하여 선택된 대응 후보점을 중심으로, 검색영역은 168×168 (pixel)의 크기로, 윈도우는 7×7 (pixel) 크기로 설정하였다.

다음단계인 point transfer는 저해상의 image pyramid에서의 feature matching으로 결정된 대응점을 다음 level의 image pyramid와 매칭 시켜주는 과정을 의미한다.

Feature matching 과정을 통해 추출된 대응점들 중에는 잘못 매칭된 결과가 포함될 수 있다. 왜냐하면, 입력된 입체영상의 획득시기의 차이로 인하여 일부 지역의 형태가 달라 질 수 있고, 영상의 픽셀 값이 거의 일정하거나 그림자의 영향을 받는 지역이 선택 될 수 있기 때문이다. 이와 같은 이유로 잘못된 대응점을 선별하는 작업이 추가적으로 수행되어야 한다. 이를 위해 반복적인 최소제곱법에 기반한 least square matching 기법이 개발되었다(Helava, 1988). Least square matching은 feature matching 과정을 통해 추출된 대응점들에 대하여 지정된 검색영역의 크기에 따라 수행된다. 본 연구에서는 실험적인 방법에 의하여 168×168 (pixel) 크기의 검색영역을 지정하였다.

이상과 같은 대응점 추출과정은 초기 파라미터의 설정만을 제외하고, 모두 자동으로 진행되었으며, 반복적인 실험과 시각적인 검증을 통해 만족할 만한 정확도의 대응점 추출이 가능하였다.

2) KOMPSAT-2 RPC를 이용한 대응점의 3차원 지상좌표 계산

KOMPSAT-2는 대상지역의 3차원 위치결정을 위하여 RPC가 포함된 자료를 제공한다. RPC 모델은 위성 영상과 지상과의 기하학적인 관계를 간단한 구면이나 평면으로 표현이 가능하다는 가정 하에, 그 관계를 여러 개의 다항식으로 표현하여 해석하고자 한 방법으로 RPC는 RPC 모델에 사용되는 계수이다. 이와 관련하여 KOMPSAT-2에서 제공하고 있는 RPC 모델의 수식은

다음과 같다(Tao and Hu, 2000).

$$r_n = \frac{p1(X_n, Y_n, Z_n)}{p2(X_n, Y_n, Z_n)}, c_n = \frac{p3(X_n, Y_n, Z_n)}{p4(X_n, Y_n, Z_n)} \quad (1)$$

위 식에서 (r_n, c_n) 는 영상좌표, (X_n, Y_n, Z_n) 은 지상좌표를 나타내며 -1에서 +1사이의 값으로 정규화 된 값으로 표현된다.

3) SRTM DEM을 이용한 대응점의 3차원 지상좌표 보정

KOMPSAT-2 RPC로 계산된 지상좌표는 일정량의 오차를 포함하고 있다. 이러한 오차를 보정하기 위하여 SRTM DEM과 대응점사이의 cross-correlation을 이용하여 대응점의 3차원 지상좌표 보정한다. 이러한 과정은 KOMPSAT-2 RPC를 이용하여 3차원 위치를 결정했을 때 절대오차는 크지만, 상대오차는 매우 작았던 결과에 근거한다(오관영 등, 2011). 이 때, 사용된 cross-correlation 수식은 다음과 같다.

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^N [Z_i - \mu][Z_{DEMi} - \mu_{DEM}]}{\sqrt{\sum_{i=1}^N [Z_i - \mu]^2 \cdot \sum_{i=1}^N [Z_{DEMi} - \mu_{DEM}]^2}} \quad (2)$$

위 수식에서 ρ 는 상관계수, Z_i 와 μ 는 RPC 모델로 계산된 고도와 그 평균값, Z_{DEMi} 와 μ_{DEM} 은 수치표고모델에서 추출한 고도와 평균값을 나타낸다. N 은 전체 대응점의 개수이다.

초기 계산된 3차원 지상좌표는 수치표고모델과 X(경도)방향, Y(위도)방향 및 Z(고도)방향으로 일정한 오차($\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$)를 지닌다고 가정하고, 각 대응점의 수평좌표(X_i, Y_i)에 해당하는 고도를 수치표고모델(Z_{DEMi})자료로부터 추출한다. 만약 수평좌표가 원 지상좌표의 수평좌표와 다르다면 각 대응점에서 상기 수치표고모델로부터 추출된 고도와 초기 계산된 3차원 지상좌표의 고도의 차이는 일정하지 않을 것이다. 이는 원 지상좌표의 수평좌표가 아닌 곳에서 고도를 추출하였기 때문에 두 고도값은 서로 다른 값을 지니게 되고, 각 대응점에 대해서 일정한 오차를 지니지 못한다. 그러나 계산된 3차원 지상좌표의 수평좌표(X_i, Y_i)에 일정한 오차가 더해진 좌표($X_i + \Delta X, Y_i + \Delta Y$)가 원 지상좌표와 동일한 위치이고, 이 위치에서 수치표고모델의 고도를 추출하였다면, 이 고도는 초기 계산된 3차원 지상좌표의 고도(Z_i)와

Fig. 3. Pyramid chip for correlation map.

일정한 오차를 지닐 것이다. 여기서, 일정한 오차를 지닌다는 것은 Z_i 와 Z_{DEMi} 이 대부분의 대응점에 대해 거의 동일한 차이를 보인다는 것이고, 이는 바로 상관계수가 높다는 것을 의미한다.

RPC 모델의 정확도에 따라 초기 검색영역의 크기와 간격을 결정하고, 모든 대응점에 대하여 검색영역에 대한 수평좌표($X_i + \Delta X(n, m)$, $Y_i + \Delta Y(n, m)$)를 계산한다. 수평좌표에 해당하는 고도를 수치표고모델에서 추출하고, 수치표고모델에서 추출된 고도 $Z_{DEMi}(n, m)$ 와 초기 계산된 3차원 지상좌표의 고도(Z_i) 사이의 상관계수맵을 작성한다. 상관계수맵에서 최대값을 결정하고, 상관계수가 최대인 위치로부터 X와 Y방향으로 X방향의 오차(ΔX)와 Y방향의 오차(ΔY)를 결정한다. 그리고 결정된 수평좌표로부터 $Z_{DEMi}(n, m)$ 와 Z_i 의 차를 계산하여 고도오차(ΔZ)를 결정하고, 초기 결정된 3차원 지상좌표에 (ΔX , ΔY , ΔZ)을 더하여 보정한다.

초기 계산된 3차원 지상좌표의 고도(Z_i)와 지정한 검색영역에 대하여 수치표고모델에서 추출된 고도 $Z_{DEMi}(n, m)$ 와의 상관계수맵을 작성할 때, 여러 단계의

피라미드 칩(pyramid chip)을 적용한다. 피라미드 칩은 상관계수맵의 작성을 위해 필요한 수치표고모델과 검색영역, 검색간격의 크기로 구성되며, 각 단계가 올라감에 따라 수치표고모델의 해상도는 증가되고, 검색영역의 크기는 감소된다. 이때, 수치표고자료의 해상도는 지정된 검색영역의 간격에 따른다. 순차적인 단계의 피라미드 칩과 초기지상좌표의 고도(Z_i)사이의 상관계수맵을 작성하고, 각 단계별 상관계수맵의 최대값 위치로부터 보다 정밀하게 오차를 보정한다. 본 연구에서는 실험적인 방법에 근거하여, 3단계의 피라미드 칩을 적용하였으며, 각 단계별 검색영역은 500×500 m, 30×30 m, 15×15 m, 검색간격은 5 m, 1 m, 0.5 m로 설정하였다(Fig. 3).

4) RPC 보정 모델의 model parameters 결정

본 연구에서 사용한 RPC 보정 모델은 오관영 등(2011)이 제안한 방법으로 지상기준점을 이용하여 수학적 보정 모델을 수립하고, 이를 RPC 모델에 추가하는 방식으로 진행된다. 제안된 보정 모델은 다음과 같다.

Fig. 4. Flow chart of KOMPSAT-2 RPC adjustment model (modified from Oh *et al.*, 2011).

$$\Delta_c = \alpha_0 l + \beta_0 \quad \Delta_l = \alpha_1 c + \beta_1 \quad (3)$$

여기서, Δ_c 과 Δ_l 는 각각 RPC에 의해 계산된 컬럼방향과 라인방향으로의 오차이며, c 과 l 는 각각 컬럼수와 라인수이고, $\alpha_0, \alpha_1, \beta_0, \beta_1$ 는 RPC 편이 보정 계수이다.

상기과정을 통해 보정된 모든 대응점을 지상기준점으로 이용하여, 상기 제안된 RPC 보정 모델의 모델 파라미터를 결정한다. Fig. 4는 오관영 등(2011)이 제안한 KOMPSAT-2 RPC 편이 보정식의 유도과정을 나타낸다.

3. 실험 데이터

1) KOMPSAT-2 입체영상

본 연구에서는 도심과 산악지형을 동시에 관찰할 수 있어 지형적 특성에 대한 영향이 적고, 인근에 GPS 상

시관측소가 있어 지상데이터의 획득이 용이한 대전지역을 연구 대상지역으로 선정하였다. 사용된 영상은 2009년 04월 12일과 2009년 09월 10일에 촬영된 KOMPSAT-2 입체영상으로 1 m급 흑백영상이다. 영상의 촬영 시기는 약 5개월의 시차를 가지고 있으며, 좌·우측 영상은 각각 16.8도와 -19.2도로 촬영되었다 (Table 1, Fig. 5).

Table 1. Characteristics of the KOMPSAT-2 satellite system

Char.	Left image	Right image
Acquisition data	2009-04-12	2009-09-10
Look angle(deg.)	-19.2	16.8
Resolution	1 m	
Col, Row	15000, 15500	
Footprint	15 × 15 km	
Revisit rate	28 days (orbital period)	
	3 days (by roll angle of 30 deg.)

Fig. 5. KOMPSAT-2 stereo pair, left image (a) right image (b).

Fig. 6. SRTM DEM, shadow relief map (a), grey-scale area map (b).

2) SRTM DEM

수치표고모델은 지표면의 수평위치에 대한 고도 값을 일정한 간격에 따라 래스터(raster) 형식으로 표현한 것이다. 국내의 경우, LiDAR 자료 등을 통해 제작된 고 해상 수치표고모델이 일반화 되어 있다. 반면, 국외에서는 군사적, 상업적인 이유, 기술적 한계 등으로 고해상 수치표고모델이 구축되어 있지 않거나, 비공개 되어있다.

한편, 상대적으로 저해상도의 글로벌 DEM은 전 세계 대부분의 지역을 표현한다. 대표적인 글로벌 DEM으로 ASTER(Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) DEM과 SRTM DEM이 있으며, 다양한 분야에서 그 활용성과 가치를 인정받고 있다. 만약, 글로벌 DEM을 이용하여 KOMPSAT-2 RPC 모델이 지니고 있는 기하 왜곡을 보정 할 수 있다면, 전 세계 지역에서 지상기준점을 추출하기 위해 드는 시간과 비용을 획기적으로 줄일 수 있을 것이다.

한편, 강경호 등(2010)은 ASTER DEM과 SRTM DEM의 구축정확도에 대한 연구를 수행하였다. 정확도 평가는 1:5000 수치지형도와 15 m 의 해상도로 보간한 ASTER DEM과 SRTM DEM을 이용하였으며, 평지의 경우 SRTM DEM이 상대적으로 높은 정확도를 나타냈다. 이는 Rodriguez *et al.*(2005)의 연구에서 숲 등이 포함된 산악지역 보다 평지에서 SRTM DEM의 정확도가 높게 나타난 결과와 연관되어 있다. 영상에서의 대응

점은 도로, 건물 등의 경계선 등 평지에서 추출되는 것이 일반적이므로, 본 연구에서는 SRTM DEM을 활용하는 것이 적합하다고 판단하였다.

본 연구에서 사용된 SRTM DEM은 미국 USGS에서 무료로 배포하고 있다. SRTM 프로그램은 우주왕복선 엔데버호의 C-band, X-band 안테나를 이용한 레이더 간섭기법(interferometry)으로 지구 전체의 고해상도 지형정보를 구축하기 위해 수행되었으며, 그 결과물로 전지구의 약 80%에 대한 지형정보를 포함하고 있는 SRTM DEM을 제작하였다. 관련 해상도는 미국의 경우 30 m(1 arc), 미국을 제외한 전 세계(위도 N60° - S56°) 지역은 90 m(3 arc)의 해상도를 지니고 있다. 또한, 데이터는 수평방향으로 WGS84, 수직방향으로 EGM 96 지오이드(geoid)를 참고하여 경위도 좌표계로 표현하고 있다. 본 연구에서는 90 m 해상도의 SRTM DEM을 사용하였으며, 대상 지역은 대전광역시 인근으로 평균고도는 약 179.46 m, 표준편차는 107.82 m 의 값을 나타낸다(Fig. 6).

연구에서 사용한 SRTM의 절대 수평 오차(absolute geolocation error)는 7.6 m(RMSE) 이하의 값을 지니며, 절대 고도 오차(absolute height error)와 절대 상대 오차(relative height error)는 각각 5.5 m(RMSE), 5.9 m(RMSE) 이하의 높은 정확도를 나타낸다(Table 2). 또한, SRTM의 수평오차의 평균은 0.5 m 이하로 편

Table 2. Characteristics of the STRM DEM(Modified from Passini and Jacobsen, 2007)

Resolution	90 m(3 arc)
Absolute geolocation error	$4.4 \text{ m} \leq \text{RMSE(Root Mean Square Error)} \leq 7.6 \text{ m (WGS84)}$
Absolute height error	$3.4 \text{ m} \leq \text{RMSE} \leq 5.5 \text{ m (Mean sea level)}$
Relative height error	$2.8 \text{ m} \leq \text{RMSE} \leq 5.9 \text{ m (Mean sea level)}$
Datum	WGS84(horizontal), EGM96(vertical)
URL	Available at : http://earthexplorer.usgs.gov

이가 없는 것으로 알려져 있고, 수직오차의 평균은 최대 1.8 m이다 (Rodriguez *et al.*, 2005).

4. 결과 및 분석

개발된 알고리즘의 정확도 평가를 위하여 33개 검사점을 사용하였다. 33개의 검사점은 영상전체에 골고루 분포하도록 선정하였고, 현장에 대한 GPS 실측을 통해 획득하였다. GPS 데이터의 수신은 TRIMBLE 5700장비를 이용하였고, Total RMSE 0.1 m 이내의 정확도로 측정되었다. Fig. 7은 33개의 검사점과 자동으로 추출된 100개의 대응점 분포를 나타낸다.

먼저 33개 검사점을 이용하여 제공된 RPC의 정확도를 평가하였다. 33개 검사점에 대한 좌·우측 영상에서의 실제 영상좌표를 입력값으로 3차원 지상좌표의 계산하였다. 계산된 지상좌표의 오차는 X와 Y, Z방향에 대하여 각각 -15.39 m, -114.33 m, -101.10 m로 매우 큰 값을 지니지만, 표준편차는 2.29 m, 5.37 m, 2.65 m로 거의 일정한 차이를 보였다(Table 3). 이는 추출된 대응점에 대하여 3차원 지상좌표를 계산하였을 때, 이들 값은 수치표고모델과 X(경도)방향, Y(위도)방향 및 Z(고도)방향으로 일정한 오차를 지닌다는 것을 의미 한다.

대응점은 총 100개를 추출하였으며, 수치표고모델은 90 m의 공간해상도를 지니는 SRTM DEM을 이용하였다. 대응점에 대해 계산된 고도와 수치표고모델로부터 추출된 고도사이의 상관계수맵을 제작하기 위하여 3단계의 피라미드 칩을 적용하였다. 각 단계별 검색영역은 $500 \times 500 \text{ m}$, $30 \times 30 \text{ m}$, $15 \times 15 \text{ m}$, 검색간격은 5 m, 1 m, 0.5 m로 설정하였다. 이때, 수치표고모델의 해상도는 설정된 검색간격을 따르며, 각 단계별 수치표고모델은 스플라인(spline) 보간법을 사용하여 생성하였다.

Fig. 7. Distribution of check points and tie points.

Table 3. 3D positioning errors estimated from RPC at 33 check points

Parameters	Directions		
	X	Y	Z
Mean(m)	-15.39	-114.33	-101.10
STD.(m)	2.29	5.37	2.65

Fig. 8은 각각 1단계와 3단계의 피라미드 칩을 통해 제작된 상관계수맵을 나타낸다. 총 3단계의 상관계수맵으로부터 최종적으로 결정된 X방향의 오차(ΔX)는 13 m이었으며, Y방향의 오차(ΔY)는 123 m이었고, 고도오차(ΔZ)는 103 m였다.

모든 대응점에서 초기 결정된 3차원 지상좌표에 (ΔX , ΔY , ΔZ)을 더하여 보정한 값을 지상기준점으로 하여 모델 파라미터를 결정한 후, 검사점을 이용하여 개발된 알고리즘의 성능을 분석하였다. 33개의 검사점에 대하여 X, Y방향 CE90(Circular Error at 90%)은 16.04 m, Z방향 LE90(Lineal Error at 90%)은 5 m를 나타냈으며, X, Y 및 Z방향으로의 RMSE는 각각 3.55 m, 9.70 m 및 3.58 m로 모든 방향으로 10 m 이내의

Fig. 8. Correlation maps between heights of SRTM DEM and heights estimated by RPC at tie points, coarse correlation map (a) fine correlation map (b).

Fig. 9. 3D positioning errors in (a) X-, (b) Y- and (c) Z- directions, Corrected 3D positioning errors in (d) X-, (e) Y- and (f) Z- directions at 33 check points.

Fig. 10. Stereo geopositioning errors.

Table 4. Initial 3D positioning error at check points

Parameters	Directions		
	X	Y	Z
Mean(m)	-15.39	-114.33	-101.10
STD.(m)	2.29	5.37	2.65
RMSE(m)	3.55	9.70	3.58

정확도를 보였다(Table 4, Fig. 10). Fig. 9 는 33개 검사점에 대하여 초기 제공된 RPC 모델로 계산된 X, Y 및 Z의 오차(Fig. 9(a, b, c))와 제안된 보정 모델로 계산된 X, Y 및 Z의 오차(Fig. 9(d, e, f))를 나타낸다. 또한, Fig. 10은 제안된 보정 모델로 계산된 수평 위치 오차(CE90)과 수직 오차(LE90)를 나타낸다.

이러한 결과는 대응점과 약 90 m의 SRTM DEM으로부터 X, Y 및 Z방향으로 10 m이내의 정확도를 보인다는 것을 의미한다. RPC의 X, Y 및 Z 편이가 100점의 대응점을 이용하여 보정되기 때문에 SRTM DEM 오차의 표준편차보다는 오차의 평균에 크게 의존하게 된다. 그러므로 SRTM DEM이 약 90 m의 공간 해상도를 지니고, 절대 수평과 수직오차(RMSE)가 약 7.6 m와 5.5 m라 할지라도 오차의 평균은 수평과 수직방향으로 0.5 m이내와 1.8 m이내이기 때문에, 즉 편이가 없기 때문에, 10 m이내의 정확도를 얻을 수 있다. 향후 제안된 방법에 대한 정확도의 일반화를 위하여 몬테카를로 시뮬레이션(Monte-Carlo Simulation)을 수행할 예정이다.

5. 결 론

본 연구에서는 지상기준점에 대한 직접적인 실측 없이 USGS에서 무료로 제공하는 SRTM DEM과 위성영상간의 대응점만을 이용해서, RPC로 계산된 지상좌표의 오차를 보정하는 자동 기하 보정 방법을 고안하였다. 제안된 모델의 정확도를 검증하기 위하여 1쌍의 KOMPSAT-2 입체영상과 영상 내의 33개 검사점을 이용하였고, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, KOMPSAT-2 RPC 모델을 이용하여 33개 검사점에 대한 지상좌표를 계산했을 때, X와 Y, Z방향의 오차는 -15.39 m, -114.33 m, -101.10 m로 매우 큰 값을 지니지만, 표준편차는 2.29 m, 5.37 m, 2.65 m로 거의 일정한 차이를 보였다.

둘째, 100개의 대응점에 대해 계산된 고도와 수치표고모델로부터 추출된 고도사이의 상관계수맵을 제작하기 위하여 3단계의 피라미드 칩을 적용하였다. 총 3단계의 상관계수맵으로부터 결정된 X방향의 오차(ΔX)는 13 m, Y방향의 오차(ΔY)는 123 m, 고도오차(ΔZ)는 103 m를 나타냈다.

셋째, 모든 대응점에서 초기 결정된 3차원 지상좌표에 (ΔX , ΔY , ΔZ)를 더하여 보정한 값을 지상기준점으로 하여 RPC 보정 모델의 파라미터를 결정하였다. 33개의 검사점에 대하여 X, Y 및 Z방향으로의 RMSE는 각각 3.55 m, 9.70 m 및 3.58 m로 모든 방향으로 10 m이내의 향상된 정확도를 보였다

사 사

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었으며(2009-0067697), 또한 공간정보 전문 인력 양성사업의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

- 강경호, 김창재, 손홍규, 이원희, 2010. 1:5000 수치지형도를 이용한 ASTER DEM과 SRTM DEM의 구축정확도 평가, 한국측량학회지, 28(1): 169-178.
- 오관영, 정형섭, 이원진, 이동택, 2011. KOMPSAT-2 RPC를 이용한 3차원 위치결정 정확도 분석, 한국측량학회지, 29(1): 531-537.
- 한유경, 김덕진, 김용일, 2011. 선형정보를 이용한 고해상도 광학영상과 SAR 영상간 기하 보정, 원격탐사학회지, 27(2): 141-150.
- Dare, P.M. and I.J., Dowman, 2000. Automatic registration of SAR and SPOT imagery based on multiple feature extraction and matching, *Proc. of 2000 International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Honolulu, Hawaii, Jul. 24-28, pp. 2896-2898.
- D' Angelo, P., P. Schwind, T. Krauss, F. Barner, and P. Reinartz, 2009. Automated DSM based georeferencing of Cartosat-1 stereo scenes, *Proc. of 2009 International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, Hannover, Germany, Jun. 2-5, in CD.
- Ebner, H., G. Strunz, and I. Colomina, 1991. Block triangulation with aerial and space imagery using DTM as control information, *Proc. of 1991 American Congress on Surveying and Mapping/American Society for photogrammetry and Remote Sensing*, Baltimore, Maryland, Mar. 25-29, pp. 76-85.
- ERDAS, 2009. ERDAS Field Guide, ERDAS inc. Leica Geosystems.
- Förstner, W. and E. Gülch, 1987. A fast operator for detection and precise location of distinct points, corners and centers of circular features, *Proc. of 1987 International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, Interlaken, Switzerland, Jun. 2-4, pp. 281-305.
- Gianinetto, M. and M. Scaioni, 2008. Automated geometric correction of high-resolution pushbroom satellite data, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 74(1): 107-116.
- Helava, U.V., 1988. Object space least square correlation, *Proc. of 1988 International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Kyoto, Japan, Jul. 1-10, vol. 27, pp. 297-302.
- Heipke, C., H. Ebner, R. Schmidt, M. Spiegel, R. Brand, A. Baumgartner, and G. Neukum, 2004. Camera orientation of Mars Express using DTM information, *Lecture Notes in Computer Science*, 3175(2004), pp. 544-552.
- Huang, L. and Z. Li, 2010. Feature-based image registration using the shape context, *International Journal of Remote Sensing*, 31(8): 2169-2177.
- Jung, H.S., S.H., Hong, and J.S., Won, 2008. Validation and selection of GCPs obtained from ERS SAR and the SRTM DEM: Application to SPOT DEM Construction, *Korean Journal of Remote Sensing*, 24(5): 483-496.
- Kim, T.J. and Y.J. Im, 2003. Automatic satellite image registration by combination of stereo matching and random sample consensus, *Geoscience & Remote Sensing*, 41(5): 1111-1117.
- Lü, Y. 1988. Interest operator and fast implementation, *Proc. of 1988 International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Kyoto, Japan, Jul. 1-10, vol. 27, pp. 491-500.
- Lim, Y., M. Kim, T. Kim, and S. Cho. 2004. Automatic precision correction of satellite images using the gcp chips of lower resolution, *Proc. of 2004 International Geoscience*

- and Remote Sensing Symposium*, Anchorage, Hawaii, Sep. 20-24, 2, pp. 1394-1397.
- Passini, R.M. and K. Jacobsen, 2007. Accuracy analysis of SRTM height models, *Proc. of 2007 American Society for photogrammetry and Remote Sensing*, Tampa, Florida, May. 25-29, in CD.
- Rodriguez, E., C.S. Morris, J.E. Belz, E.C. Chapin, J.M. Martin, W. Daffer, and S. Hensley, 2005. An assessment of the SRTM topographic products, *Technical Report JPL D-31639*, Jet Propulsion Laboratory.
- Tao, C.V. and Y. Hu, 2000. Image rectification using a generic sensor model-rational function model, *Proc. of 2000 International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Amsterdam, Netherlands, vol. XXXIII, pp. 359-366.
- Wang, Y., 1998. Principles and applications of structural image matching, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 25: 154-165.
- Wang, Y., 1999. Automated triangulation of linear scanner imagery, *Proc. of 1999 International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, Hannover, Germany, Sep. 27-30, in CD.
- Zou, X.L., H.B. MA, and C.H. Ge, 2003. Feature-based multi-resolution SAR and TM images auto-registration, *Proc. of 2003 International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Changsha, China, Oct. 8-13, 2, pp. 1278-1282.