

SRTM DEM을 이용한 SPOT-5 DEM의 조정 비교

Comparison of SPOT-5 DEM Control with SRTM DEM

이효성¹⁾ · 한동엽²⁾

Lee, Hyoseong · Han, Dongyeob

Abstract

It is necessary to register precisely Digital Elevation Model (DEM) generated from SPOT-5 stereo images in order to monitor the topographic and environmental changes of important topographic features such as Mt. Baekdu. The SPOT-5 DEM is registered taking SRTM DEM as a reference DEM. If SPOT-5 DEM is transformed with single 3D rigid equation, it has many errors. Therefore, this study extracted uniformly ground control points over study area and estimated locally adapted transformation equation. The accuracy of proposed method was evaluated with comparison to scale-based and GCP-based transformation method.

Keywords : SPOT-5 stereo images, DEM, SRTM, registration

초 록

백두산과 같은 중요 지형의 지형적 환경적 모니터링을 수행하기 위하여 SPOT-5 스테레오 위성영상을 이용하여 제작된 DEM의 정확한 보정이 필요하다. 기존 DEM으로 SRTM DEM을 사용하여 SPOT-5 DEM을 보정하였다. SPOT-5 DEM과 SRTM DEM은 단일 강체 변환식으로 변환하는 경우 오차를 많이 내포하였다. 따라서 본 연구에서는 대상 지역에 골고루 기준점을 추출하고, 기준점으로부터 지역적 변환식을 추정하였다. 제안된 방법의 정확도를 평가하기 위하여, 축척기반과 SIFT기반의 변환식을 이용한 DEM과 비교하였다.

핵심어: SPOT-5 입체 영상, DEM, SRTM, 보정

1. 서 론

백두산 화산 문제에 관한 남북간 회의, 식생의 환경 변화 등 국내외 많은 관심에도 불구하고 백두산의 변화를 관측하기 위한 측지학적 계측장비가 설치되어 있지 않으며, 고해상도 수치표고모델(DEM; Digital Elevation Model)도 확보되어 있지 않다(김상완, 2003). 백두산의 정밀한 모니터링을 위하여 위성영상을 이용하여 백두산의 DEM을 생성하고 SIFT에 의한 기준점을 추출하여 SRTM DEM에 기하보정하려는 연구가 진행되었다(이효성 등, 2010). DEM간의 보정은 고해상의 새롭게 생성된 DEM을 기존의 DEM에 대체 또는 융합하거나, SAR Interferometry를 이용하여 DEM을 생성 또는 변화탐지하는 등의 연구에서

이루어졌다.

Li와 Bethel(2007)은 정교한 DEM 보정을 위한 초기 단계로 두 번의 DEM 조정, 즉 수직 조정과 수평 조정을 수행하였다. 초기 조정 후에 최소제곱 정합이 이루어졌다. 기존 DEM과 InSAR DEM간의 3차원 대응점을 찾기 위하여 주 파수 영역에서 교차상관법이 적용되었으며, 7인자 3차원 변환식(Mikhail 등, 2001)이 사용되었다. Hosford 등(2003)은 레이저 고도계 데이터의 융합과 입체 레이더 영상을 이용하여 생성된 DEM을 이용하여 향상된 정밀도의 DEM 생성을 위해 지구통계학적 방법을 사용하였다. 자료를 통합하여 이용한 결과 DEM의 정확도는 초기 입체 레이더영상으로부터 생성된 DEM보다 더 낮은 결과를 보였다. Carpenter와 Hogarty(2007)은 DEM의 수평 및 수직 정

1) 정회원 · 순천대학교 공과대학 토목공학과 부교수(E-mail: hslee@sunchon.ac.kr)

2) 교신저자 · 정회원 · 전남대학교 공과대학 해양토목공학과 조교수(E-mail: hozilla@chonnam.ac.kr)

확도를 평가하기 위하여 DEM을 비교하였다. 이들은 수평방향 보정에 3개의 알고리즘, CFE(Coarse/Fine Exhaustive) 알고리즘, CWP(Coarse with Parabolic Refinement) 알고리즘, ULS(Unified Least Squares) 알고리즘을 이용하는 HAT(HRTI Analysis Tool)를 사용하여 처리하였다. 최적변환은 오차의 평균제곱을 최소화하여 결정된다.

Wessel 등(2008)은 TanDEM-X DEM의 보정에서 통계적 연구를 통하여 시스템의 정오차특성을 3차 다항식으로 모델링하였다. DEM 오차를 제거하기 위하여 지상기준점 및 접합점 추출, 최소제곱조정이 이루어졌다. 주요 기준점 데이터는 ICESat 레이저 고도계 데이터이며, 접합점 추출은 100×100의 영상칩(image chip)이 사용되었다. 영상칩은 일정한 간격(2×10km, 1×5km, 1×1km)으로 구분된 공간내에서 추출되었다. Lu 등(2003)은 TOPSAR DEM 데이터를 보정하기 위하여 교차상관계수를 이용하여 기준점을 찾고, 수평 및 수직 변위량을 계산하였다. 이러한 보정방법은 JPL(Jet Propulsion Laboratory)에서 개발된 “multi-match-multimosaic” 프로그램을 이용한 것이다. 변환식은 3D 어핀식을 사용하였으며, 변환식을 이용하여 DEM 데이터를 모자이킹하였다. Gruen과 Akca(2005)는 3차원 점군(point cloud) 데이터에서 최소제곱 보정방법을 제안하였다. Karkee 등(2006)은 ASTER DEM과 SRTM을 융합하는 과정에서 계곡과 등선에서 정합점을 찾았으며, 수직방향만 기하보정하였다. 정합점 추출은 주파수 공간에서 이루어졌다. Gonçalves(2006)는 PCI Geomatica 소프트웨어를 이용하여 SPOT 1과 SPOT 2 스테레오 위성영상의 위성보조자료와 동일점 영상좌표로 DEM을 제작한 후, SRTM-DEM과 상관계수 매칭을 실시하여 DEM의 이동량을 계산하고, 이로부터 SPOT 위성영상의 외부표정요소를 재계산하였다.

강경호 등(2010)은 ASTER DEM과 SRTM DEM의 구축 정확도를 평가하여 SRTM DEM의 활용성을 제시하였다. 본 연구와 동일지역을 실험한 이효성 등(2010)의 연구에서는 대상지역이 백두산 주변을 모두 포함하지 않고, 일부 지역에서 이루어져 연구의 적용성에 대한 검증이 필요하다.

본 연구는 SPOT-5 백두산 DEM의 정확한 보정을 위해 NASA JPL에서 제공하는 SRTM DEM을 활용하였다. SPOT-5 DEM을 보정하는 방법으로 축척계수 조정에 의한 변환, SIFT(Scale-Invariant Feature Transform)기반의 정합점 추출과 변환, 다수 기준점을 이용한 지역적 최적화 변환 방법을 비교하였다. 정밀 기준점을 이용하여 SPOT-5

DEM의 오차모델링 수렴이 어려운 상황에서 지역적 변환식으로 오차를 모델링하는 최적화 방법을 제안하였다.

2. 정합점 추출 방법

2.1 교차상관계수기반 추출

교차상관계수는 비교되는 2개의 일정 영역간에 화소값의 상관성을 비교하는 값으로 식 (1)과 같이 구할 수 있다. 일반적으로 영상의 화소 정합시에 정합쌍으로 가정하는 임계값은 0.8 내외이며, 목적에 따라 변경할 수 있다. 후보 정합점을 찾는 특징점 추출과 두 영상을 기준 영상과 탐색 영상으로 바꾸어 일관성을 검사하는 처리가 수행된다.

$$T(A, B) = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (A(i, j) \times B(i, j))^2}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (A(i, j))^2 \times \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (B(i, j))^2}} \quad (-1 \leq T \leq 1) \quad (1)$$

여기서, $A(i, j)$, $B(i, j)$: 어떤 화소 (i, j) 의 화소값

n, m : 영역의 가로, 세로 크기

2.2 SIFT기반 추출

SIFT 알고리즘은(Lowe, 2004)은 영상의 특징 개체들을 이동, 회전, 축척 및 다른 영상인자에 불변인 지역적 개체좌표로 변환 가능하다. 탐색영역은 영상좌표, 축척, 방향 정보를 포함하고 있으며, 이 정보를 이용하여 그라디언트(gradient) 히스토그램을 계산하고, 가장 큰 그라디언트 방향이 위로 향하도록 회전시킨 후, 4×4 영역의 그라디언트 히스토그램을 8방향 히스토그램 배열로 나누어 SIFT 기술벡터를 생성한다. 각 영상에서 독립적으로 생성된 특징점의 기술자를 “closest/next closest ratio” 방법으로 처리하면 정합쌍을 찾을 수 있다.

3. 실험 및 분석

3.1 입력 DEM 자료

위성영상은 표 1에서 같이 2007년 09월 28일과 10월 13일에 관측 수집된 백두산 일대의 전정색 SPOT-5호 입체 영상이며, 영상에서 포함하는 지상면적은 약 25×25km이다. 실험 대상지역은 백두산 천지를 중심으로 가로방향 10km, 세로방향 15km이고, 높이는 SRTM DEM 기준으로 대략 1400m에서 2700m이다(그림 2). 그림 1에서 기준점의 분포를 보면, 천지 아래쪽에는 고루 분포하고 있으며, 천

지 위쪽에는 적게 분포되어 있다. 기준점과 ERDAS 소프트웨어를 이용하여 SPOT-5 DEM을 생성하였다(이효성 등, 2010). SPOT-5 DEM은 평면위치 정확도에 비해 수직위치 정확도가 낮은 것으로 나타났다(표 2). SPOT-5 DEM은 SRTM DEM에 비해 해상도가 상대적으로 높아 세밀한 모습을 볼 수 있지만, SPOT-5 DEM은 산악지역과 구름에 의한 영향 등으로 인하여 부정확한 정합이 많이 발생하였다(그림 2). SPOT 2A 레벨 영상의 평면 정확도가 SRTM DEM에 비해 상대적으로 정확도가 떨어지기 때문에 표 2의 결과보다 SPOT-5 DEM의 절대오차는 더 클 수 있다.

SPOT-5 DEM은 20m 공간 해상도이며, SRTM DEM은 3" 공간 해상도를 20m로 재배열하였다. DEM은 1261×801 화소로 약 25×16km이다.

표 1. SPOT-5 입체위성영상의 주요제원

| | Left image | Right image |
|-------------------|------------------|------------------|
| Acquisition date | 2007-10-13 | 2007-09-24 |
| Sun azimuth | 143° 55' | 133° 04' |
| Sun elevation | 71° 28' | 69° 04' |
| Incident angle | 10.89° | 27.14° |
| Image size | 6000×6000 pixels | 6000×6000 pixels |
| Level | 2A | |
| Altitude | 832km | |
| Resolution | 5m | |
| Coordinate system | WGS84 | |

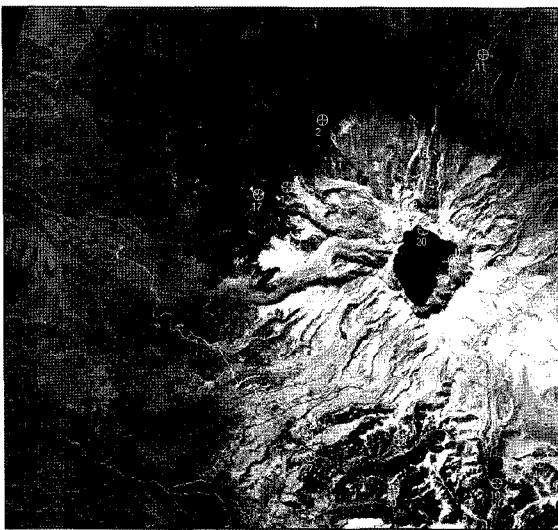


그림 1. SPOT-5 2007년 09월 24일 영상과 기준점

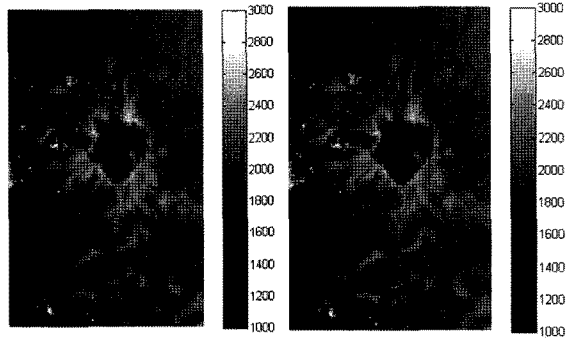


그림 2. (좌) SRTM DEM과 (우) SPOT-5 DEM

표 2. SPOT-5 DEM의 검사점 정밀도

| | RMSE X | RMSE Y | RMSE Z |
|-----|--------|--------|--------|
| 검사점 | 19.5m | 28.6m | 68.5m |

3.2 신뢰영역 설정

SPOT-5 DEM의 일부 지역은 오차가 크게 포함되어 있다. 오차가 큰 지역은 정합점 추출을 위한 대상 지역에서 제외하고, 나머지 지역에서 대응쌍을 추출하였다. 오차가 큰 지역은 등고선 형태를 비교하여 쉽게 확인할 수 있지만(그림 3), 정량적으로 구분하기 어렵다. 따라서, 교차상관계수를 이용하여 구분하였다. 신뢰영역 설정에서 교차상관계수의 영역크기와 이진화를 위한 임계계수값을 설정하는 것이 필요하다. 교차상관을 위한 영역의 크기가 작으면 불안정성이 증대되고, 너무 크면 분별력이 떨어지고 시간이 많이 소요된다.

본 연구에서는 3×3, 5×5, 7×7, 9×9 크기의 영역크기로 교차상관계수 영상을 생성하고(그림 4), 상관계수값의

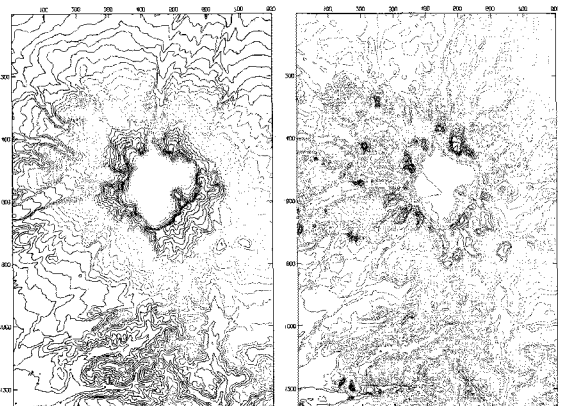


그림 3. SRTM DEM과 SPOT-5 DEM의 등고선

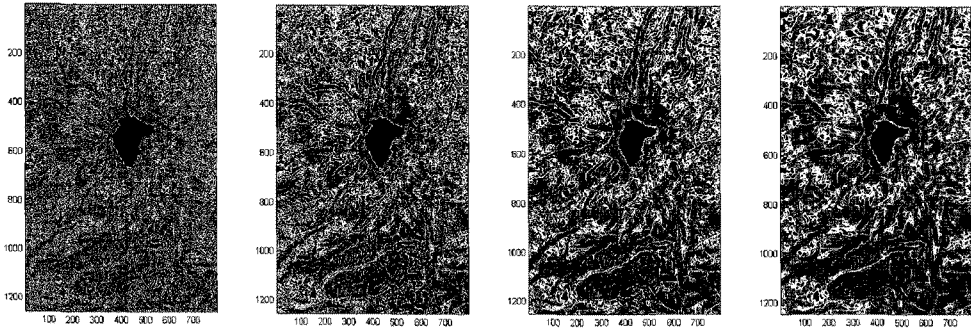


그림 4. 3×3, 5×5, 7×7, 9×9 영역크기별 교차상관계수

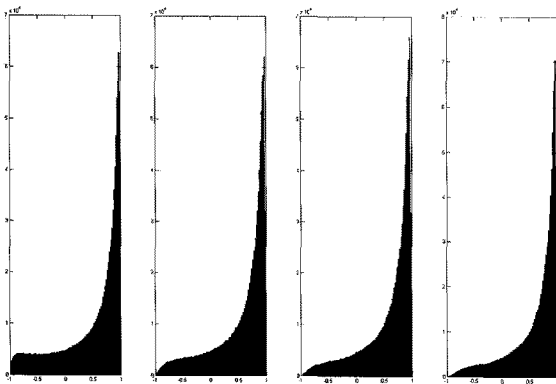


그림 5. 3×3, 5×5, 7×7, 9×9 영역크기별 상관계수의 히스토그램



그림 6. 5×5 영역크기의 이진화 신뢰영역

히스토그램을 비교하였다(그림 5). 영역크기나 상관계수

에 따라 결과의 영향을 뚜렷하게 구분짓기 어려웠다. 그러나 실험에 사용된 DEM의 해상도는 20m이고, SRTM DEM의 원 해상도는 90m이므로 5×5 영역크기를 임의로 사용했으며, 상대적으로 엄격한 임계계수를 생각하여 0.85를 이진화 임계값으로 설정하였다. 0.85로 설정된 신뢰영역은 전체영상의 약 34%이었다(그림 6). 신뢰영역의 분포가 천지 아래쪽에 많이 존재하며, 이러한 분포형태는 변환식에 사용되는 정합점의 분포가 편향되는 원인이 된다. 따라서, 가능한 분포를 전체 영역에 균등하게 분포시키려는 노력이 필요하다.

신뢰성있는 후보 기준점을 추출하기 위하여 고려한 2 번째 요소는 기준점을 전체 영역에서 균등하게 추출하는 것이다. SIFT기반 정합점의 변환식 추정에서 정합점의 균등 추출이 고려되었다. 균등 추출 방법은 전체 영상을 일정한 크기의 영역으로 나누고 영역별로 정합점을 추출한 후, 일정 개수의 정합점만을 사용하는 것이다. 실험결과 추출 정합점의 수가 가장 많이 생성되는 경우는 각 영역을 100×100으로 설정한 경우이며, 정합점 추출 실험에서 이 값을 사용하였다.

3.3 축척 변환

신뢰영역내에 점들 중 99% 중간값들을 대상으로 한 표고값의 히스토그램은 그림 7과 같다. 기준점의 높이값에 오차가 크기 때문에 DEM의 표고차이가 크게 나타나고 있다. 실제로 신뢰영역의 SRTM DEM은 (최소,최대,범위)가(1390,2596,1206)m이고, SPOT-5 DEM은 (1579.1, 2433.7,854.6)m이다. 이효성 등(2010)의 연구결과에서도 기준점의 변환 방향도 중간 높이를 기준으로 높은 표고는 더 높게, 낮은 표고는 더 낮게 변환되었다. 따라서, 두 DEM의 높이 범위와 중간 위치를 조정하여 높이오차를 최소화하는 높이 오프셋 및 축척값을 구하였다.

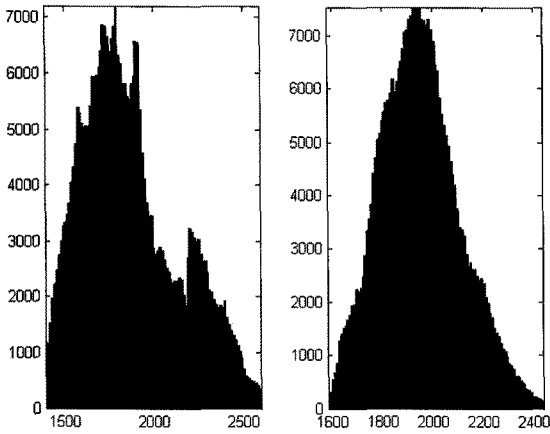


그림 7. 신뢰영역내 표고값의 히스토그램

DEM의 표고값 변환식은 식 (2)와 같다. 식 (2)의 목적은 그림 7에서 볼 수 있는 것처럼 SPOT-5 DEM의 표고범위가 SRTM DEM 표고범위보다 작기 때문에 1이상의 축척을 적용하여 범위를 확대하고, 확대 처리 전에 중심위치를 맞추주기 위하여 오프셋을 찾는 것이다. 축척의 범위는

+1.0~+1.8이고, 오프셋은 두 DEM의 중앙값(median)을 이용하여 개략적으로 설정하였다. 실험 결과 초기 DEM이 동값과 축척값이 오차에 영향을 주로 끼치는 것으로 나타났다. 식 (2)에서 세 개의 변수에 대하여 일정 범위내에서 값을 변화시켜가며, 최소오차를 나타내는 변수값을 구하였다. 그림 8은 최소오차를 나타내는 값에서 변수값의 2차원 변화를 나타낸다. 실험 결과 최소값은 $S=-0.216$, $O_1=48$, $O_2=16$ 에서 나타났다.

$$Z_{srtm} = (1.4 \pm S) \times (Z_{spot5} - 1940 \pm O_1) + 1790 \pm O_2 \quad (2)$$

여기서, Z_{srtm} , Z_{spot5} : SRTM과 SPOT5 DEM의 표고값

S : 축척변수

O_1, O_2 : 오프셋 변수

최소오차의 변수값을 적용하여 변환된 SPOT-5 DEM과 SRTM의 오차는 그림 9와 같다. 오차의 99%범위는 -614.5m에서, +535.9m이고, 높이차가 50m 이상인 지역은 전체의 약 77%이다. 축척 변환만으로 오차조정에 한계가 있으므로 나타났다.

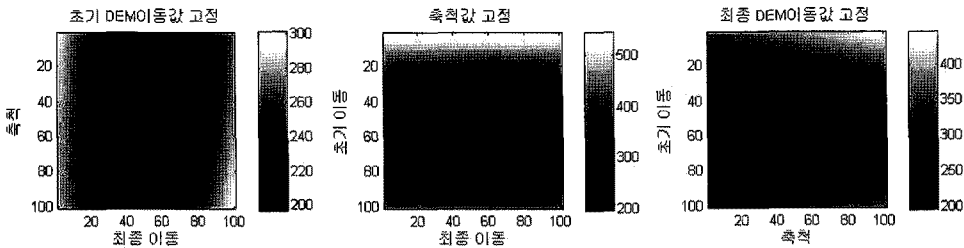


그림 8. 최소오차 변수값에서 나머지 변수에 대한 오차

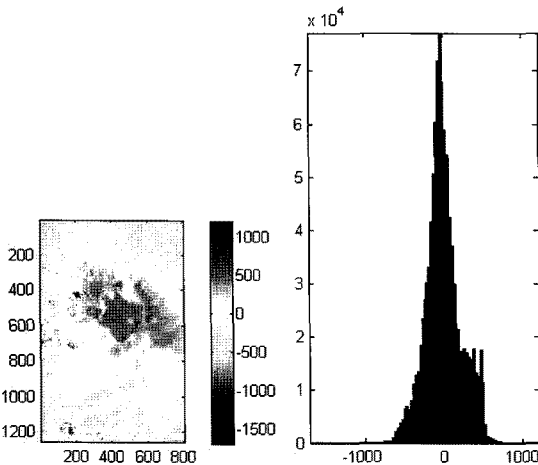


그림 9. 축척변환 후 DEM 오차

3.4 SIFT기반 변환

기존 SRTM DEM과 보정된 SPOT-5 DEM간의 SIFT기반 정합점을 추출하고 3D 어핀 변환식으로 최소제곱 조정하였다. 두 DEM에 영역을 나누어 SIFT 정합점을 추출하였으며, 정합점이 추출되지 않은 영역에서는 상관계수기반의 정합점을 추출하여 보완하였다. 추출된 모든 후보쌍에 대하여 2차원 projective 변환의 RANSAC 조건으로 오차쌍을 제거하였다. 두 DEM 간의 SIFT 방법에 의한 최종 정합쌍은 그림 10과 같다.

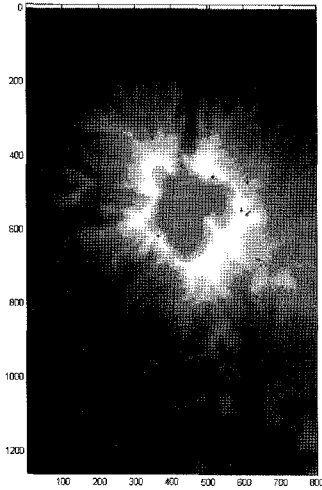


그림 10. 영역별로 추출된 SIFT기반 정합점과 DEM간 10배의 평면오차선

총 113점이 추출되었으며, 영역별 1점만을 사용하여 변환에 52점을 이용하였다. 최소제곱조정 후 3D 어핀 변환 식은 식 (3)과 같다.

$$\begin{aligned} X_{srtm} &= 1.0030 \cdot X_{spot5} + 0.0010 \cdot Y_{spot5} - 0.0165 \cdot Z_{spot5} - 5880.2 \\ Y_{srtm} &= -0.0004 \cdot X_{spot5} + 1.0020 \cdot Y_{spot5} - 0.0317 \cdot Z_{spot5} - 8887.7 \quad (3) \\ Z_{srtm} &= 0.0187 \cdot X_{spot5} + 0.0106 \cdot Y_{spot5} + 0.9375 \cdot Z_{spot5} - 57193 \end{aligned}$$

52개의 3차원 정합점간의 거리는 변환전 평균 418.7m에서 변환식을 적용한 후, 평균 367.2m로 낮아졌다. 식 (3)을 이용하여 SPOT-5 DEM을 기하보정하고, 높이차를 구하였다(그림 11). 오차의 99%범위는 -677.9m에서, +369.2m이

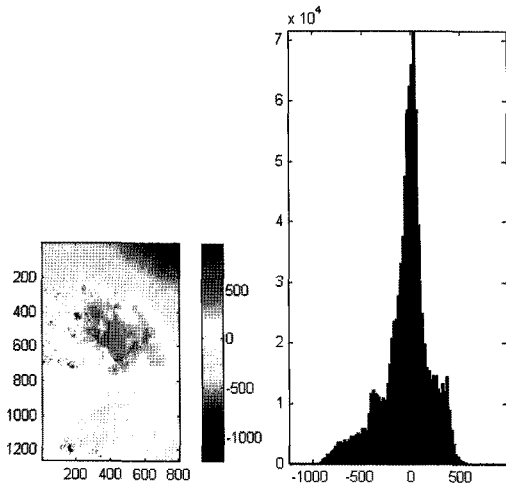


그림 11. SIFT기반 변환 후 DEM 오차

고, 높이차가 50m 이상인 지역은 전체의 약 71%이다. 축척 변환에 비하여 결과가 나아졌지만, 이상단 부분의 음수 오차가 크게 나타났다.

3.5 지역적 최적화 변환

SIFT기반 변환에서 추출된 113개의 정합쌍을 이용하여 DEM의 높이차를 스플라인으로 추정하였다. SRTM DEM과 지역적 최적화에 의하여 변환된 SPOT-5 DEM의 차이를 이전 방법과 마찬가지로 분석하였다. 오차의 99%범위는 -167.6m에서, +205.3m이고, 높이차가 50m 이상인 지역은 전체의 약 55%이다. 축척 및 SIFT기반 변환보다 결과

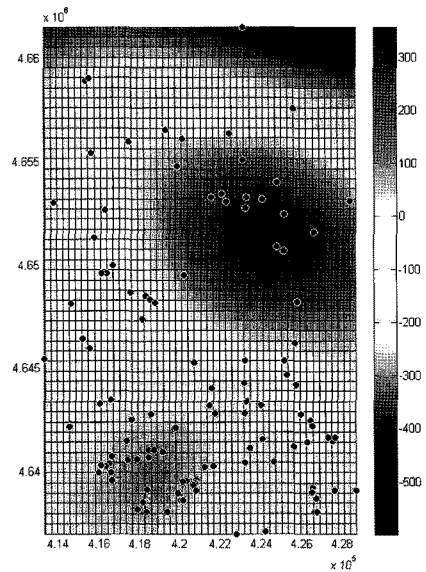


그림 12. 스플라인 추정을 위한 기준점과 추정된 오차 모델

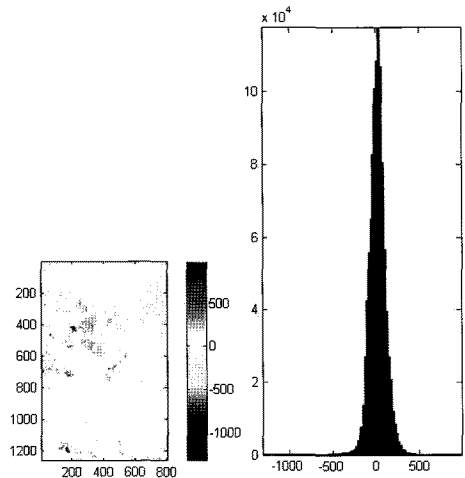


그림 13. 지역적 최적화 변환 후 DEM 오차

가 크게 향상됐다. 부분적으로 오차가 크게 나타나는 부분은 SPOT-5 DEM의 정합 오류에 의한 것으로 여겨지며, 상관계수 등의 방법으로 정합쌍이 더 많이 활용되면 세밀한 스플라인 모델식도 생성될 수 있다고 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 백두산 지역의 SPOT-5 입체 위성영상으로부터 획득된 SPOT-5 DEM을 SRTM DEM에 맞춰 조정하였다. SPOT-5 DEM은 SRTM DEM에 비해 공간해상도가 높고, 최신의 자세한 지형정보를 제공한다. SPOT-5 DEM 생성 과정에서 기준점 정보의 불명확성이 DEM에 포함되어 있기 때문에 상대적으로 정확한 SRTM DEM을 기준으로 보정하여 활용하는 것이 필요하다.

SPOT-5 DEM에 축척변환, SIFT기반의 기준점을 이용한 3차원 어핀 변환, 지역적 최적화 변환의 3가지 보정 방법을 비교하였다. 축척변환과 SIFT기반의 기준점을 이용한 3차원 어핀 변환은 변환후에도 오차의 99%범위가 각각 (-614.5m,+535.9m), (-677.9m,+369.2m)이고, 오차분포가 정규분포에서 벗어나는 결과를 보여주었다. 그에 비하여 다수의 기준점을 이용한 지역적 최적화 변환은 3차원 변환식으로 모델링하기 어려운 오차를 상대적으로 잘 보완하여, 오차의 99%범위가 (-167.6m,+205.3m)이고 정규분포에 가까웠다. 오차모델 생성에 곡률, 에지 등의 기준 개체 정보를 가능한 많이 활용한다면, 복잡한 오차의 조정방법으로 활용가능성이 높을 것으로 판단된다. 그리고 본 연구 결과는 레이더 간섭기법(SAR Interferometry)과 같은 처리에서 DEM간의 상대보정에도 활용될 수 있다고 본다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 첨단도시기술개발사업 - 지능형 국토정보기술혁신 사업과제의 연구비지원(07국토정보 C04)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

김상완 (2003), L-밴드 영상레이더 위상간섭기법을 이용한 백두산 및 부산지역의 지표면 변위관측, 박사학위논문, 연세대학교, pp. 1-174.

강경호, 김창재, 손홍규, 이원희 (2010), 1:5000 수치지형도를 이용한 ASTER DEM과 SRTM DEM의 구축정확도 평가, 한국측량학회지, 한국측량학회, 제 28권, 제 1호, pp. 169~178.

이효성, 안기원, 박병욱, 오재홍, 한동엽 (2010), SPOT-5 스테레오 영상을 이용한 백두산 DEM 제작과 보정, 한국측량학회지, 한국측량학회, 제 28권, 제 5호, pp. 555-560.

Gonçalves, J. A. (2006), Orientation of SPOT stereopairs by means of matching a relative DEM and the SRTM-DEM. *Proceedings of the International Calibration and Orientation Workshop-EuroCow2006*, Barcelona(CD-ROM).

Lowe, D. (2004), Distinctive image features from scale-invariant keypoints, *International Journal on Computer Vision, IJCV*, Vol. 60, No. 2, pp. 91-110.

Carpenter, J. and Hogarty, J. (2007), Multiple DEM measured accuracy, *ASPRS 2007*

Hosford, S., Baghdadi, N., Bourhine, B., Daniels, P. and King, C. (2003), Fusion of airborne laser altimeter and RADARSAT data for DEM generation, *Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Vol. 2, pp. 806-808.

Karkee, M., Kusanagi, M. and Steward, B.L. (2006), Fusion of optical and InSAR DEMs improving the quality of free data, *2006 ASABE Annual International Meeting*, American Society of Agricultural and Biological Engineers, Portland, Oregon.

Li, Z.T. and Bethel, J. (2007), DEM Alignment and Registration in Interferometric SAR Processing and Evaluation, *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, pp. 4890-4893.

Lu, Z., Fielding, E., Patrick, M.R. and Trautwein, C.M. (2003), Estimating lava volume by precision combination of multiple baseline spaceborne and airborne interferometric synthetic aperture radar: the 1997 eruption of Okmok volcano, Alaska, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 41, No. 6, pp. 1428-1436.

Mikhail, E. M. and Bethel, J. S. (2001), *Introduction to Modern Photogrammetry*, John Wiley & Sons Inc., New York.

Wessel, B., Gruber, A., Gonzalez, J.H., Bachmann, M. and Wendleder, A. (2008), TANDEM-X: DEM Calibration concept, *IGARSS 2008*, pp. 111-114.