

고해상도 위성영상과 기존 수치표고모델을 이용하여 신뢰성이 향상된 수치표고모델의 자동 생성

이 태 윤* · 정 재 훈** · 김 태 정***

Automatic generation of reliable DEM using DTED level 2 data from high resolution satellite images

TaeYoon Lee* · Jae-Hoon Jung** · Taejung Kim***

요 약

스테레오 영상으로부터 수치표고모델을 생성하기 위해서는 일반적으로 두 영상 간의 정합을 수행한다. 정합은 초기 정합 후보점으로부터 시작되며, 두 영상 간의 접합점(Tie-points)이 이러한 초기 후보점 역할을 하게 된다. 이 초기 정합 후보점의 개수와 영상 내에서의 분포는 정합결과에 영향을 준다. 정합결과를 바탕으로 생성되는 수치표고모델에는 에러가 포함된다. 이러한 에러를 제거하는 가장 보편적인 방법은 주변값으로 보간하는 것이다. 본 논문에서는 신뢰성 있는 수치표고모델을 자동으로 생성하기 위해서 기존 수치표고모델을 이용하여 자동으로 추출한 접합점(Tie-points)과 영상 피라미드 그리고 정합 결과에서 발생한 이상값(Outlier)을 기존 수치표고모델로 보정하는 방법을 제안한다. 본 논문에서는 IKONOS, QuickBird, SPOT5 스테레오 영상과 DTED level 2 데이터를 이용하여 실험을 수행했으며, 실험결과를 통해서 제안된 방법으로 생성한 수치표고모델에서는 에러가 모두 제거되었음을 보여준다. 또한 기존 DTED level 2를 참값으로 하여 산출된 높이값에 대한 RMSE는 15m 미만으로, 비교적 정확한 수치표고모델을 생성하였음을 보여준다.

주요어 : 수치표고모델, 자동 접합점 추출, 영상 피라미드, 수치표고모델의 에러 제거

ABSTRACT : If stereo images is used for Digital Elevation Model (DEM) generation, a DEM is generally made by matching left image against right image from stereo images. In stereo matching, tie-points are used as initial match candidate points. The number and distribution of

*인하대학교 지리정보공학과 박사과정(LTaeYoon@inhaian.net)

**인하대학교 지리정보공학과 석사과정(Jeong2174@inhaian.net)

***인하대학교 지리정보공학과 부교수(tezid@inha.ac.kr)

tie-points influence the matching result. DEM made from matching result has errors such as holes, peaks, etc. These errors are usually interpolated by neighbored pixel values. In this paper, we propose the DEM generation method combined with automatic tie-points extraction using existing DEM, image pyramid, and interpolating new DEM using existing DEM for more reliable DEM. For test, we used IKONOS, QuickBird, SPOT5 stereo images and a DTED level 2 data. The test results show that the proposed method automatically makes reliable DEMs. For DEM validation, we compared heights of DEM by proposed method with height of existing DTED level 2 data. In comparison result, RMSE was under than 15 m.

Keywords : DEM, automatic tie-point extraction, image pyramid, DEM error removal

1. 서 론

수치표고모델은 시뮬레이션, 3차원 도심 모델 생성, 3차원 지도 등 다양한 분야에서 필요한 데이터이다. 최근에는 높은 공간 해상도를 갖는 수치표고모델의 필요성이 증가하고 있다. 높은 공간해상도를 갖는 수치표고모델은 라이다(Lidar), SAR, 스테레오 항공사진, 고해상도 스테레오 위성 영상 등을 통해서 생성할 수 있다. 이 중에서 고해상도 위성영상은 주기적으로 획득 가능하고, 획득비용이 비교적 저렴하다. 따라서 고해상도의 위성영상을 이용하여 비교적 경제적인 수치표고모델을 생성하는 것이 가능하다.

이제까지 스테레오 영상에서 정합을 수행하여 수치표고모델을 생성하는 많은 연구들이 진행되었다. 그 중에서 영역기반(Area-based)의 스테레오 정합 기법과 특징기반(Feature-based)의 스테레오 정합 기법을 적용하여 상호간의 단점을 보완한 방법(Billard and Dissard, 2000; Billard and Maitre, 1999), 위성영상의 에피폴라 특성을 영역기반의

스테레오 정합에 적용시킨 방법(Lee, et al, 2003) 등은 보다 정확하고 신뢰성 있는 수치표고모델 생성을 위해서 제안되었다. 하지만, 아직까지 스테레오 영상을 정합하여 신뢰성 있는 수치표고모델을 생성하기는 쉽지 않으며, 따라서 생성된 수치표고모델은 별도의 후처리 과정이 필요하게 된다. 신뢰성 있는 수치표고모델 생성이 어려운 주된 이유는 정확한 스테레오 정합이 어렵기 때문이다. 한편 기존에 이미 구축되어 있는 수치표고모델들이 있으며, 대표적인 데이터로 SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) 데이터와 DTED 데이터가 있다. 최근에는 이러한 데이터들이 일부분 오픈되면서(NASA JPL, 2005), 다양한 분야에서 활용되고 있다. 하지만 이러한 기존 수치표고모델은 저해상도의 데이터이기 때문에 고해상도의 수치표고모델로 갱신해야 될 필요성이 대두되고 있다. 이러한 요인들을 비롯해서 최근의 활용적인 측면을 고려했을 때, 고해상도 위성영상으로부터 자동으로 생성된 수치표고모델의 신뢰성을 향상 시키는 것은 중요한 문제이다. 이를 위해 본 논문에서는 기존의 스테레오

정합 기법에 이미 구축되어 있는 저해상도 수치표고모델을 활용하여 자동으로 생성되는 고해상도 수치표고모델의 신뢰성을 향상시키고자 한다.

신뢰성 있는 수치표고모델의 생성을 고려했을 때, 스테레오 정합은 다음과 같은 문제점이 있다. 스테레오 영상을 이용하여 수치표고모델을 생성할 때, 정합이 시작되는 초기 정합 후보점의 개수가 많고 적음에 따라서, 영상 내에서 골고루 분포했는지에 따라서 제대로 정합된 정합점의 수가 달라지게 된다. 제대로 정합된 정합점의 수가 많을수록 생성되는 수치표고모델의 정확도와 신뢰도는 높아질 것이다. 고해상도 영상에는 균일한 밝기값이 있는 지역, 그림자, 다른 객체에 가려진 부분, 비행기 등의 움직이는 물체 등 여러 가지 요인에 의해서 실제로는 잘못된 정합이지만, 상관계수는 비교적 높게 산출되어서 큰 오차를 갖는 정합점이 존재하게 된다. 이러한 이상값(Outlier)은 생성된 수치표고모델에 영향을 주어서, 수치표고모델에 에러가 포함되게 만든다. 공백부분(Blank)과 같은 수치표고모델의 에러는 일반적으로 주변 픽셀의 보간을 통해서 보정된다. 이러한 방법은 수치표고모델의 신뢰성을 떨어뜨릴 수 있다.

본 논문에서는 고해상도 스테레오 위성영상으로부터 보다 신뢰성 있는 수치표고모델을 생성하기 위해서 기존에 생성된 수치표고모델을 이용하여 자동으로 많은 개수의 접합점을 추출하고 이를 스테레오 정합의 초기 정합 후보점으로 적용하는 방법, 정확한 접합점의 적용과 효율적인 정합을 위한 영상 피라미드 적용, 정합결

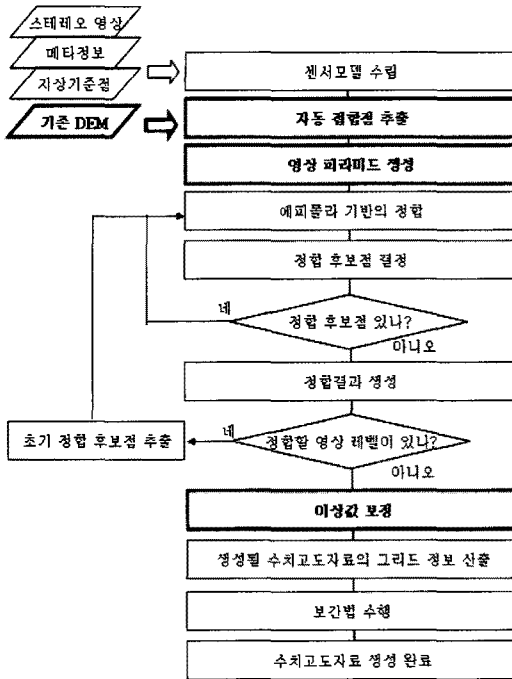
과에 존재하는 이상값을 통계적인 방법으로 추정하고 기존 수치표고모델로 보정하는 방법을 제안한다.

본 논문에서는 제안된 방법을 적용하지 않았을 때, 기존 수치표고모델로부터 자동으로 추출한 접합점을 적용했을 때, 영상 피라미드를 적용했을 때, 그리고 자동으로 추출한 접합점과 영상 피라미드를 동시에 적용했을 때, 마지막으로 정합결과의 이상값을 기존 수치표고모델로 보정하는 방법을 포함하여 제안된 방법을 모두 적용했을 때 생성된 각각의 수치표고모델을 비교하였다. 실험을 위해서 IKONOS, QuickBird, SPOT5 스테레오 위성영상을 사용하였으며, 기존 수치표고모델로는 동일 지역의 DTED level 2 데이터를 이용하였다. 생성된 수치표고모델의 정확도 검증을 위해서 기존 DTED level 2 데이터를 참값으로 하여 제안된 방법으로 생성된 수치표고모델과 비교하였다. 실험결과는 본 논문에서 제안된 방법이 비교적 정확한 수치표고모델을 자동으로 생성할 수 있음을 보여준다.

2. 기존 자료를 활용한 수치표고모델 자동 생성 알고리즘

2.1 제안된 알고리즘의 전체 과정

다음 그림 1은 본 논문에서 제안한 수치표고모델 생성 알고리즘의 전체적인 과정을 보여주고 있다. 본 논문에서는 고해상도 스테레오 위성영상에 대해서 기본적으로 에피플라 기반의 정합 방법(Lee, et al., 2003)을 적용하여 수치표고모델을 생성하



[그림 1] 제안된 알고리즘이 포함된 수치표고모델 생성 과정

였다. 그림에서 볼 수 있듯이, 수치표고모델을 생성하기 위해서는 먼저, 스테레오 위성영상의 왼쪽과 오른쪽 영상에 대해서 각각 센서모델을 수립한다. 본 논문에서 QuickBird와 SPOT5 영상의 경우에는 궤도-자세각 기반의 모델(Kim, et al., 2007)을, IKONOS 영상에는 직접선형변환(Direct Linear Transform) 모델(임용조와 김태정, 2002)을 적용하였다. 모델을 수립하기 위해서는 위성영상의 메타정보와 지상기준점이 필요하다. 지상기준점은 GPS 장비를 이용하여 실제로 측량한 데이터를 사용하였다. 다음으로 영상 피라미드 기법을 적용하여 원영상의 해상도를 낮춘 영상들(그림 3)을 생성하고, 각 영상에 대한 정합을 수행한다. 오른쪽 영상을 탐색 영역으로 가정하

고 정합을 수행할 때, 정합이 시작될 초기 정합 후보점이 필요하며 이는 두 영상의 접합점을 사용하였다. 본 논문에서는 기존의 수치표고모델로부터 접합점을 자동으로 추출하여 초기 정합 후보점으로 적용한다. 다음으로 왼쪽 영상의 초기 정합 후보점에 대한 오른쪽 영상의 에피플라 라인을 추정하고, 이를 탐색영역으로 하여 정합을 수행한다. 이때 사용된 정합 알고리즘은 정규 교차 상관정합(zero mean normalized cross-correlation)이다. 정합 결과 중에는 잘못된 정합인 오정합이 포함되어 있다. 본 논문에서는, 정합 시간의 효율성을 고려해서, 산출된 상관계수의 값이 본 논문에서 실험적으로 결정한 임계값(0.3) 보다 작으면 오정합으로 결정하였다.

초기 정합 후보점에 대한 정합이 제대로 정합된 정합점이라고 결정되면, 그 정합점을 기준으로 주변 동서남북 네 방향의 픽셀을 다음 정합에 사용될 후보점으로 결정한다. 이러한 과정을 반복하여 정합을 수행하며, 더 이상 정합 후보점이 없다면 정합결과를 생성한다. 영상 피라미드를 구성하는 영상 레벨 중에서 정합을 수행할 다음 영상이 있다면, 정합결과로부터 다음 레벨의 영상에 대한 초기 정합 후보점을 추출한다. 이때의 초기 정합 후보점은 정합결과 중에서 제대로 정합된(상관계수의 임계점이 0.3 이상) 정합점이 된다. 마지막 레벨 영상의 정합 수행 후, 정합결과가 이상값이라면, 이를 초기 수행과정에서 입력받은 기존 수치표고모델을 이용하여 보정한다. 다음으로 산출된 정합결과를 이용하여 생성될 수치표고모델의 그리드(Grid) 정보를 산출하고, 각 그리드에 들어

갈 높이값은 보간법을 통해서 추정한다. 본 논문에서는 최근린 보간법(Nearest Neighbor Interpolation)을 적용하여 수치표고모델을 생성하였다.

2.2 자동 접합점 추출

왼쪽과 오른쪽, 두 영상 간의 정합은 접합점 즉, 초기 정합 후보점으로부터 수행된다. 앞서도 언급했듯이, 초기 정합 후보점을 정합해서 얻은 정합점이 제대로 된 정합이라고 결정된다면, 이 정합점을 중심으로 동서남북 방향의 픽셀을 다음 정합 후보점으로 결정하고 다시 정합을 수행한다. 이와 같은 과정을 더 이상 정합할 후보점이 없을 때까지 수행한다. 이때, 제대로 정합되지 않은 정합점은 더 이상 정합 후보점을 만들지 않는다. 따라서 많은 초기 정합 후보점이 영상 내에서 골고루 분포해 있다면, 더 많은 정합점을 얻을 가능성이 커진다. 본 논문에서는 보다 많은 초기 정합 후보점을 추출하기 위해서 기존의 DTED level 2 데이터를 이용하였다.

GPS 장비를 이용하여 현지 측량한 지상 기준점으로 수립한 센서모델을 이용하여, 임의의 지표면 좌표에 대응되는 두 영상

의 동일 지점에 대한 픽셀 좌표를 산출하기 위해서는 해당 지표면 좌표에 대한 높이값을 알아야만 한다. 이를 해결하기 위해서 본 논문에서는 기존의 DTED level 2 데이터로부터 고해상도 위성영상의 영역 안에 있는 3차원 좌표 (X, Y, Z)를 추출하고 이를 수립된 센서모델에 적용하여 두 위성영상에서 동일한 지점의 픽셀 좌표를 산출하였다. 본 논문에서 사용한 DTED level 2 데이터에 대한 기본적인 스펙은 표 1과 같다(NIMA, 2000).

표 1에서 알 수 있듯이 DTED level 2 데이터는 30 m의 공간해상도를 갖고 있으며, 수평 기준계로 WGS84를 적용했지만, 수직 기준계는 평균해수면(MSL)을 적용하였다.

GPS 장비를 이용하여 실제로 측량한 지상기준점의 높이값은 타원체고를 기준으로 한다. 하지만, DTED 데이터는 평균해수면을 기준으로 한 높이값을 갖고 있으므로, 정확한 접합점 산출을 위해서는 DTED의 높이값을 타원체고로 변환하여야만 한다. 다음 그림은 DTED level 2 데이터로부터 임의의 지표면 좌표(경위도, 높이)를 추출하여 IKONOS의 직접선형변환 모델에 적용하고, 이를 통해서 산출된 픽셀 좌표(Column, Row)를 IKONOS 스테레오 영상

<표 1> DTED level 2 데이터의 기본 스펙

DTED level	2
수평기준계	WGS84
수직기준계	MSL (Mean Sea Level)
격자 간격	1" x 1"
공간해상도	30 m
절대수평정확도	90% 원형오차(Circular Error) WGS 84 기준 ≤ 23m
절대수직정확도	90% 선형오차(Linear Error) MSL 기준 ≤ 18m

위에 표시한 것이다.

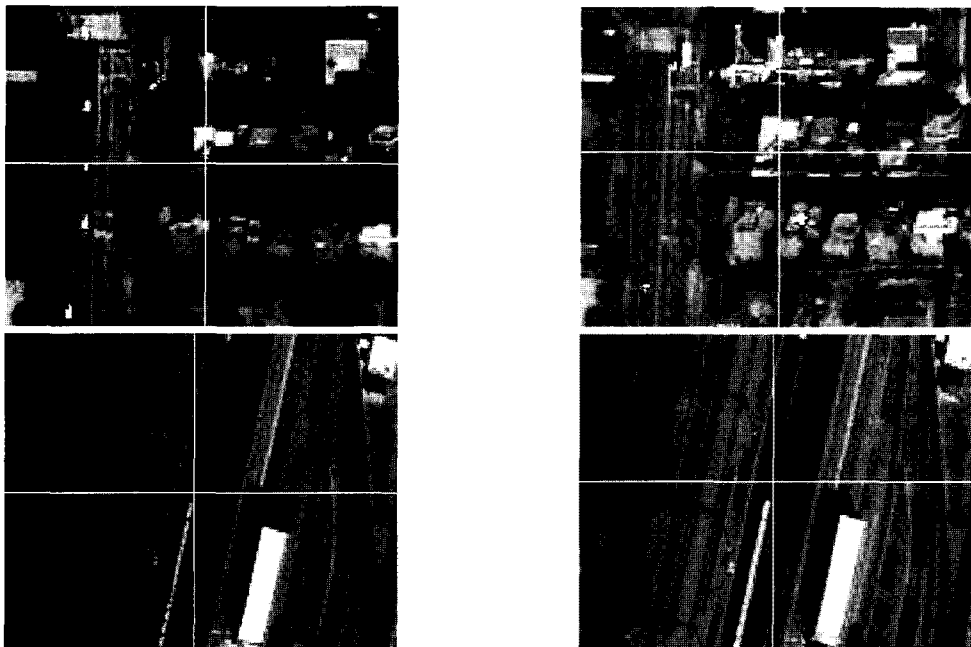
그림 2에서 왼쪽은 스테레오 영상에서 왼쪽에 해당하는 영상의 일부 이미지이고 오른쪽은 스테레오 영상에서 왼쪽에 대응되는 오른쪽 영상의 일부분을 보여주고 있다. 그림에서 두 선이 교차하는 부분이 동일한 지표면 좌표에 대해서 산출한 픽셀 좌표의 위치를 나타낸다. 위 그림에서 볼 수 있듯이, 두 영상에서 동일 지표면 좌표로 산출한 픽셀 좌표가 다른 위치를 가리키고 있음을 알 수 있다. 이는 DTED level 2 데이터와 IKONOS 영상의 공간해상도 차이를 비롯하여, 평균해수면 기준의 높이와 타원체고 기준의 높이 차로 인해서 발생한 오차라고 할 수 있다.

평균해수면 기준의 높이를 타원체고로 변환하기 위해서는 지오이드 고가 필요하

다. 지오이드 고는 EGM96을 이용하여 산출할 수 있다(NASA, 2004). 하지만, EGM96을 적용하여 DTED의 높이값을 타원체고로 변환하는 데는 많은 추가적인 시간이 필요하다. 본 논문에서는 평균해수면 기준의 높이와 타원체고 사이의 차이로 인한 높이 오차와 공간해상도에 따른 오차를 영상 피라미드를 적용하여 해결하였다.

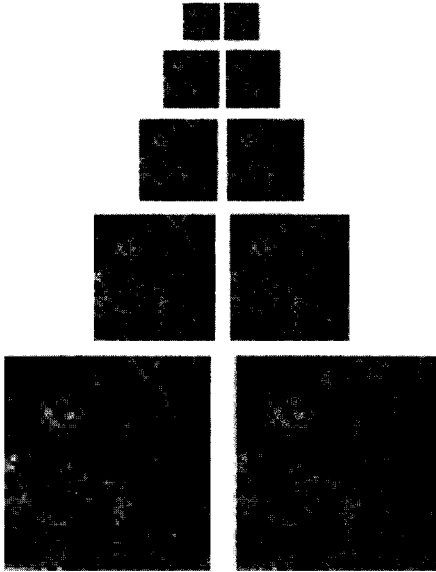
2.3 영상 피라미드

영상 피라미드는 다음 그림과 같이 영상의 원래 해상도를 일정하게 줄여나가며 낮은 해상도의 영상을 만들어내는 방법이다. 그림은 피라미드 형태처럼 보여주기 위해서 해상도가 가장 낮은 영상을 맨 윗 부분에 두어서 구성한 것이다.



[그림 2] DTED level 2 데이터를 이용해서 추출한 접합점의 오차

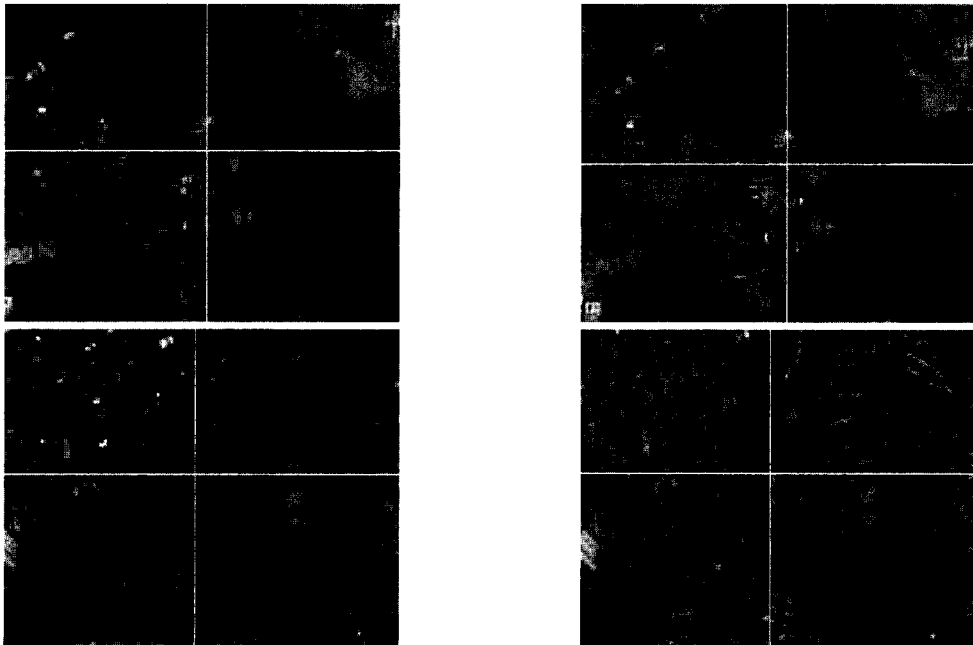
그림 3에 나타난 영상 피라미드의 경우, 본 논문에서는 맨 위쪽의 영상이 5레벨 영



[그림 3] 영상 피라미드

상이고 맨 아래의 원영상은 1레벨 영상으로 정하였다. 본 논문에서는 자동 추출한 접합점의 오차를 제거하면서, 효율적인 정합을 수행하기 위해서 영상 피라미드의 레벨을 5레벨로 결정하고 이를 수치표고 모델 생성 시 적용하였다.

DTED로부터 자동으로 추출된 접합점은 원 해상도의 위성영상에서 다른 지점을 가리키지만, 이를 충분히 낮은 해상도의 영상에 적용하게 되면 동일한 지점을 가리킬 수 있다. 이때 해상도는 원영상에서 발생하는 접합점의 픽셀 위치 차이가 거의 한 픽셀 안에 들어올 정도로 낮은 해상도여야 할 것이다. 다음 그림 4는 IKONOS의 영상 피라미드 5레벨 영상에서 그림 2와 동일한 지표면 좌표에 대한 픽셀의 위치를 나타낸 것이다.



[그림 4] 영상 피라미드 중 5레벨의 영상 위에 나타난 자동으로 추출한 접합점

그림 4와 그림 2를 비교해보면, 줄어드는 해상도로 인해서 오차(그림 2)가 없는 것(그림 4)처럼 보일 것이다. 즉, 줄어드는 해상도로 인해서 동일 지표면 좌표와 대응되는 두 영상의 지점이 동일하게 나타난다. 본 논문에서 적용한 피라미드 레벨 5는 이러한 오차 등을 고려해서 실험적으로 결정한 값이다.

다음 그림은 IKONOS 영상에 대해서 DTED level 2 데이터로부터 자동적으로 추출한 접합점의 분포를 표 2에서 나온 지상기준점 10개의 분포와 비교한 것이다. 뒤에서도 언급하지만, 본 논문에서 사용된 지상기준점은 스테레오 영상에서 동일한 지점을 측량한 것으로 접합점이기도 하다.

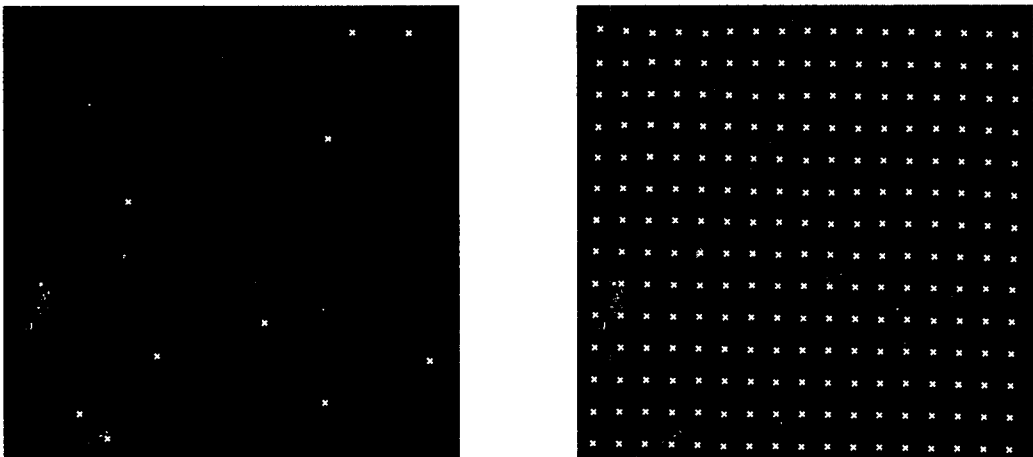
접합점의 개수와 분포 모두 정합결과에 영향을 줄 수 있는 요인이다. 위 그림에서 볼 수 있듯이 DTED level 2 데이터를 이용하여 추출한 많은 접합점은 영상 내에서 골고루 분포하기 때문에 영상의 모든 부분에 대해서 정합 가능성을 높이는 역할을 한다. 위와 같은 분포로 인한 정합결과

의 차이는 생성된 수치표고모델에도 영향을 준다. 이와 같은 접합점의 분포와 개수에 따른 수치표고모델 결과의 차이는 그림 6에서 확인할 수 있다.

DTED를 이용하여 추출한 접합점을 영상 피라미드 방법과 같이 사용할 때는 피라미드 레벨 5의 영상에만 적용하고, 나머지 레벨에서는 전단계에서 수행된 정합 결과 중에서 제대로 정합된 것이라고 판단된 점들을 초기 정합 후보점으로 사용한다. 앞에서도 언급했듯이, 정합 결과 중에서 제대로 정합된 점을 단순히 상관 계수가 0.3 이상인 점이라고 결정하였다. 이는 고해상도 위성영상의 큰 데이터 크기로 인해서 발생하는 정합 수행 시간을 고려한 것이다.

2.4 정합결과에서의 이상값 보정

서론 부분에서 언급했듯이 정합결과에는 이상값이 존재한다. 이로 인해서 최종 생성되는 수치표고모델은 에러를 포함하



[그림 5] 접합점의 분포 비교 (왼쪽: 지상기준점, 오른쪽: 자동추출 접합점)

게 된다. 이러한 에러는 주변 높이값 보다 너무 크거나 너무 작은 점 등의 공백부분으로 나타난다. 이러한 에러를 최소화 시키면서 보다 신뢰성 있는 수치표고모델을 생성하기 위해서 본 논문에서는 기존 DTED level 2 데이터를 이용하여 이상값이 존재하는 지점의 지표면 좌표(X, Y, Z)를 보정하였다. 이를 위해서는 먼저, 정합결과로부터 정합점의 높이값이 이상값인지 아닌지를 결정해야만 한다. 본 논문에서는 이러한 이상값을 5 x 5 윈도우 내에서 계산한 높이 평균값과 표준편차 그리고 실험을 통해서 얻어낸 임계값(Threshold)을 사용하여 결정하였다. 이상값을 결정하기 위해서 사용된 방법은 다음과 같다.

$$(|\text{높이값}_i - \text{평균}| / \text{표준편차}) > \text{임계값}$$

즉, 표준편차와 임계값을 고려했을 때, 평균과 크게 차이나는 높이값을 이상값으로 결정한 것이다. 위에서 i 는 높이값을 갖는 격자의 인덱스를 의미한다. 본 논문에서 임계값은 3을 사용하였다. 본 논문에서는 이상값이 결정되면, DTED level 2 데이터로부터 쌍선형 보간법(Bilinear Interpolation)과 광선추적법(Ray-Tracing)을 이용해서 이상값을 보정할 지표면 좌표를 산출하였다. 이는 다음과 같은 과정으로 수행된다. 먼저, 결정된 이상값의 정합점에서 왼쪽 영상 좌표에 대응되는 지표면 좌표를 추정

한다. 아직 높이값을 모르기 때문에 수립된 센서모델만으로는 정확한 지표면 좌표를 산출할 수 없다. 정확하지는 않지만, 추정된 지표면 좌표 중에서 높이를 제외한 2차원 좌표를 이용하여 DTED level 2 데이터로부터 높이값을 추출하였다. 이때, 높이값은 평균해수면 기준이므로 타원체고로 변환해주어야만 한다. 본 논문에서는 EGM96 으로부터 대응되는 지표면의 지오이드고를 추정 (NASA, 2004)하고 이를 적용하여 타원체고로 변환하였다. DTED level 2 데이터와 위성영상의 지표면 좌표는 공간해상도 등의 차이로 인해서 정확하게 대응되지 않는다. 이 때문에 발생하는 오차를 최소화시키기 위해서 쌍선형 보간법을 이용하였다. 이렇게 추출된 높이와 왼쪽 영상 좌표를 이용하여 대응되는 지표면 좌표를 산출한다. 이러한 과정을 반복하여 왼쪽 영상 좌표에 대응되는 정확한 지표면 좌표를 산출한다.

3. 수치표고모델 생성 실험 및 결과

본 논문에서는 IKONOS, QuickBird, SPOT5 스테레오 영상으로부터 수치표고모델을 생성하였다. 사용된 고해상도 스테레오 영상의 기본적인 정보는 표 2와 같다.

본 논문에서는 각 고해상도 위성영상에 대해서 GPS 장비를 이용하여 현지 측량한

<표 2> 실험에 사용된 고해상도 스테레오 위성영상의 기본정보

위성	IKONOS	QuickBird	SPOT5
촬영지역	대전	대전	대전
공간해상도 (m)	1	0.61	2.5
사용된 지상기준점	10	22	18

<표 3> 지상기준점으로 수립된 각 모델의 모델 RMSE

	IKONOS	QuickBird	SPOT5
왼쪽영상	1.134 pixel	1.889 pixel	0.863
오른쪽영상	1.114 pixel	1.420 pixel	0.965

지상기준점을 사용하여 센서모델을 수립하고, 이를 이용하여 수치표고모델을 생성하였다. 센서모델 수립을 위해서 사용된 지상기준점의 수는 표 2와 같다. 본 논문에서 사용된 지상기준점은 스테레오 영상의 왼쪽과 오른쪽 영상에서 동일한 지표면 좌표를 갖는다. 즉, 접합점으로도 사용 가능하다. 지상기준점으로 수립된 각 모델의 RMSE는 다음 표와 같다.

표 3에서 볼 수 있듯이, 수치표고모델을 생성할 때 사용된 센서모델의 모델오차는 2 pixel 미만의 RMSE를 갖는다.

그림 6은 IKONOS와 QuickBird 스테레오 위성영상을 이용하여 수치표고모델을 생성한 결과들을 보여준다. SPOT5의 경우에는, 그림 6처럼 생성된 수치표고모델의 해상도를 낮게 해서 보이면, 각 방법에 따른 결과의 차이점이 구별되지 않아서 전체적인 모습은 제외하였다.

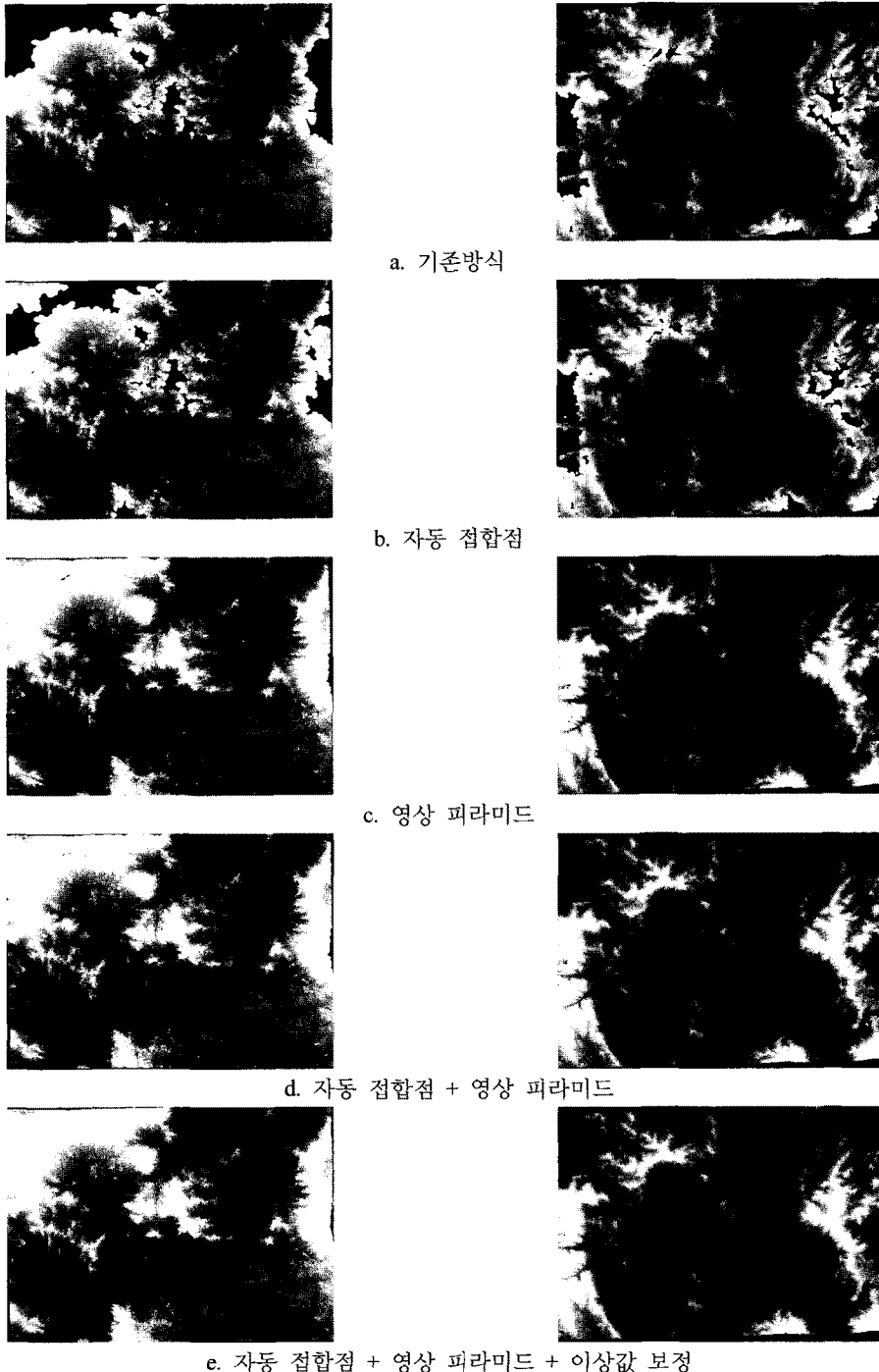
그림 6에서 a는 지상기준점을 초기 정합 후보점으로 사용하여 에피폴라 기반의 정합만으로 생성한 결과, b는 DTED 데이터로부터 많은 수의 접합점을 추출하여 적용한 결과, c는 영상 피라미드만을 적용한 결과, d는 DTED를 이용하여 자동으로 추출한 접합점과 영상 피라미드를 함께 적용한 결과, e는 d 방식의 정합결과에 포함된 이상값을 DTED 데이터로 보정하여 생성한 결과를 보여준다. 생성된 수치표고모델의 공간해상도는 모두 10m로 DTED

level 3 급의 자료이다.

그림 6 중에서 IKONOS와 QuickBird에 에피폴라 기반의 정합 방법만을 적용해서 생성된 수치표고모델(그림 6의 a)에서 볼 수 있듯이, 수치표고모델 내에 많은 에러(공백부분)가 있음을 알 수 있다. 이런 에러는 DTED에서 자동으로 추출한 접합점과 영상 피라미드를 모두 적용한 결과(그림 6의 d)에서 거의 사라졌음을 볼 수 있다. 하지만, 일부 에러는 여전히 존재하고 있다. 이러한 부분은 주변의 높이값으로 채울 수 있지만, 보다 신뢰성 있는 수치표고모델을 위해서 본 논문에서는 DTED를 이용하여 보정하였다. 제안된 방법을 적용한 최종 결과에서는 이러한 에러가 없음을 확인할 수 있다(그림 6의 e).

본 논문에서는 생성된 수치표고모델의 정량적인 분석을 위해서 기존의 DTED level 2 데이터와 비교하였다. DTED level 2 데이터는 제안된 스펙에 맞춰서 만들어졌으므로, 비교적 정확하고 신뢰성 있는 데이터라고 할 수 있다. 실험을 통해서 생성된 수치표고모델은 DTED level 2 데이터와 다른 공간해상도를 갖고 있으므로, 수치표고모델의 임의의 점과 대응되는 DTED level 2 데이터에서의 점을 찾기 위해서 쌍선형 보간법을 적용하였다. 쌍선형 보간법을 이용하여 제안된 알고리즘으로 생성한 수치표고모델의 임의의 지점과 대응되는 DTED 지점의 높이값을 비교하여, 그 차이

고해상도 위성영상과 기존 수치표고모델을 이용하여 신뢰성이 향상된 수치표고모델의 자동 생성



[그림 6] 제안된 방법을 단계적으로 적용했을 때(b, c, d, e)와 적용하지 않았을 때(a) 생성한 수치표고모델 결과 (왼쪽: IKONOS, 오른쪽: QuickBird)

로 평균절대오차(Mean Absolute Error; MAE)와 RMSE를 산출하였다. 그 결과는 다음 표 4와 같다. MAE와 RMSE를 산출하는데 사용된 점의 개수는 약 4,800 (IKONOS), 6,000 (QuickBird), 21,000 (SPOT5) 개이다. 사용된 점의 개수가 다른 것은 생성된 수치표고모델의 크기가 다르기 때문이다.

표 4에서 볼 수 있듯이, 기존의 DTED level 2 데이터를 참값이라고 가정했을 때, 본 논문에서 제시된 방법(자동 접합점+영상피라미드+이상값 보정)으로 생성한 수치표고모델의 높이값에 대한 MAE는 10 m 이하였고 RMSE는 15 m 미만이었다. 이는 각각 적용된 방법들에 의해서 생성된 수치표고모델의 수직정확도를 고려했을 때, 가장 높은 정확도를 보여주는 것이다. 표 4의 결과에서 자동 접합점을 적용한 결과와 기존 방법을 적용한 결과의 차이가 그림 6에서 보는 것과는 다르게 유사한 정확도를 보여주고 있다. 이는 위 표에서 산출한 MAE와 RMSE는 생성된 수치표고모델에서 공백부분에 대한 값은 제외하고 계산되었기 때문이다. 영상 피라미드를 적용

했을 때의 결과와 자동 접합점과 영상 피라미드를 모두 적용했을 때의 결과도 유사하게 나타나는데, 이 또한 생성된 수치표고모델의 공백부분을 계산에 포함시키지 않아서 나타난 결과라고 생각한다.

기존의 DTED 데이터가 스펙상의 정확도(표 1)로 만들어졌기 때문에 위 표의 결과를 통해서, 제안된 알고리즘이 자동적으로 비교적 정확한 수치표고모델을 생성할 수 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 고해상도의 스테레오 위성영상으로부터 자동적으로 신뢰성 있는 수치표고모델을 생성하기 위하여 기존의 수치표고모델을 이용하여 자동으로 추출한 접합점(초기 정합 후보점)과 영상 피라미드 그리고 정합 결과에 포함되어 있는 이상값을 기존 수치표고모델을 이용하여 보정하는 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 IKONOS, QuickBird, SPOT5. 세 종류의 고

<표 4> 기존방법과 제안된 방법에 의해서 생성된 수치표고모델의 수직정확도

위성 종류	평가척도 (m)	수치표고모델 생성을 위해서 적용된 방법				
		기존방법	자동 접합점	영상피라미드	자동 접합점 + 영상피라미드	자동 접합점 + 영상피라미드 + 이상값 보정
IKONOS	MAE	9.884	10.386	9.679	9.833	8.282
	RMSE	15.507	16.536	13.436	13.724	10.985
QuickBird	MAE	9.754	9.836	9.506	9.297	7.883
	RMSE	13.148	13.302	13.692	13.056	10.363
SPOT5	MAE	11.497	11.347	10.816	10.816	10.072
	RMSE	17.531	17.135	15.527	15.489	14.225

해상도 스테레오 위성영상에 적용하여 실험하였고, 기존 수치표고모델로 DTED level 2 데이터를 사용하였다. 제안된 각각의 방법을 적용하고, 최종적으로 제안된 방법 모두를 적용하여 그 결과를 육안으로 비교하여 보았다. 그 결과 제안된 방법 모두를 적용하여 생성한 수치표고모델에서는 포함된 에러가 모두 제거되었다. 정량적인 분석을 위해서 제안된 방법으로 생성한 수치표고모델의 높이값을 기존의 DTED level 2 데이터의 높이값과 비교하였다. 그 결과, 기존의 DTED level 2 데이터를 정확한 수치표고모델이라고 가정했을 때, 제안된 방법으로 생성된 수치표고모델의 RMSE는 15 m 미만이었다. 이와 같은 결과를 통해서 제안된 알고리즘이 자동적으로 비교적 신뢰성 있는 수치표고모델을 생성하였음을 알 수 있었다. 이것은 본 논문에서 제안한 방법과 기존 수치표고모델을 이용하여, 자동으로 생성되어지는 고해상도 수치표고모델의 신뢰성 향상이 가능하다는 것을 보여준다.

또한 본 연구와 관련해서, 기존 수치표고모델과 정사영상을 이용하여 고해상도 위성영상의 센서모델링에 필요한 기준점을 자동으로 추출하는 연구도 수행되고 있다(이태운 등, 2007). 이러한 연구를 보다 발전시키고 연계시키면, 기존 데이터를 활용하여 자동적으로 신뢰성 높은 고해상도의 수치표고모델을 생성할 수 있을 것이라고 생각한다.

본 논문에서는 DTED level 2 데이터를 제안된 방법으로 생성된 수치표고모델의 정확도 검증을 위해서 사용했지만, 향후 보다 높은 공간해상도를 갖고, 보다 정확

한 데이터를 이용하여 제안된 방법을 검증할 필요가 있다. 또한 현재 제안된 방법은 시간적인 효율성 보다는 기존 데이터의 활용과 생성되는 수치표고모델의 신뢰성 향상 등에 초점을 맞추었기 때문에 보다 빠르게 생성될 수 있도록 개선할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 첨단도시기술개발사업 - 지능형국토정보기술혁신 사업과제의 연구비지원(07국토정보C03)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- 강상혁, 김승호, 권재혁, 2002, GIS 데이터를 이용한 오염 유출량의 해석과 폐쇄성 구역의 적용에 관한 연구, 한국GIS학회지, 10(2):263-273
- 김지은, 이근상, 조기성, 장영률, 2000, 섬진강 유역 수문인자 추출을 위한 GIS와 RS의 활용, 한국GIS학회지, 8(2):257-274
- 이태운, 김태정, 박완용, 2007, 정사영상과 DTED level 2 자료에서 자동 추출한 지상기준점의 IKONOS 위성영상 모델링 적용 가능성 연구, 한국지형공간정보학회지, 15(4):103-109
- 임용조, 김태정, 2002, SPOT, EOC, IKONOS 스테레오 영상으로부터 생성된 도심지역 DEM의 정확도 및 성능 비교분석, 대한원격탐사학회지, 18(4):221-231
- Baillard, C. and H. Maitre, 1999, 3-D Reconstruction of Urban Scenes from Aerial Stereo Imagery: A Focusing Strategy, Computer Vision and

- Image Understanding, 76(3):244-258
- Baillard C. and O. Dissard, 2000, A Stereo Matching Algorithm for Urban Digital Elevation Models, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 66(9):1119-1128
- Kim Taejung, Hyunsuk Kim, and Sooahm Rhee, 2007, Investigation of Physical Sensor Models for Modelling SPOT 3 Orbits, The Photogrammetric Record, 22(119):257-273
- Lee Hea Yeoun, Taejung Kim, and Wonkyu Park, 2003, Extraction of Digital Elevation Models from satellite stereo images through stereo matching based on Epipolarity and Scene Geometry, Image and Vision Computing, 21(9):789-796
- NASA, 2004, <http://cddis.gsfc.nasa.gov/926/egm96/doc/S11.HTML#References>
- NASA JPL (Jet Propulsion Laboratory), 2005, <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/datapro-d.htm>
- NIMA (National Imagery and Mapping Agency), 2000, Performance Specification Digital Terrain Elevation Data (DTED), MIL-PRF-89020B, <http://www.nga.mil/ast/fm/acq/8902-0B.pdf>
-
- 접수일 (2008년 6월 12일)
수정일 (2008년 7월 15일)
게재확정일 (2008년 7월 21일)