

스테레오 정합을 이용한 3차원 재구성 과정의 정량적 평가

Quantitative Assessment of 3D Reconstruction Procedure Using Stereo Matching

우 동 민**

Dong-Min Woo**

Abstract

The quantitative evaluation of DEM(Digital Elevation Map) is very important to the assessment of the effectiveness for the applied 3D image analysis technique. This paper presents a new quantitative evaluation method of 3D reconstruction process by using synthetic images. The proposed method is based on the assumption that a preacquired DEM and ortho-image should be the pseudo ground truth. The proposed evaluation process begins by generating a pair of photo-realistic synthetic images of the terrain from any viewpoint in terms of application of the constructed ray tracing algorithm to the pseudo ground truth. By comparing the DEM obtained by a pair of photo-realistic synthetic images with the assumed pseudo ground truth, we can analyze the quantitative error in DEM and evaluate the effectiveness of the applied 3D analysis method. To verify the effectiveness of the proposed evaluation method, we carry out the quantitative and the qualitative experiments. For the quantitative experiment, we prove the accuracy of the photo-realistic synthetic image. Also, the proposed evaluation method is experimented on the 3D reconstruction with regards to the change of the matching window. Based on the fact that the experimental result agrees with the anticipation, we can qualitatively manifest the effectiveness of the proposed evaluation method.

요 약

3차원 영상 해석 기법에 의해 구해진 DEM(Digital Elevation Map)을 정량적으로 평가하는 것은 영상 해석 기법의 유효성을 검증하기 위해 매우 중요하다. 본 논문에서는 모의 영상 제작에 의한 3차원 재구성 과정의 새로운 정량적 평가 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 미리 확보된 DEM과 정사영상(ortho-image)을 가상의 실제 값(pseudo ground truth)으로 가정한 것에 의한 것이다. 제안된 방법의 과정은 그래픽스에서 사용되는 ray tracing 알고리즘을 구성하여 가상의 실제 값에 적용함으로써 원하는 시점으로부터의 한 쌍의 모의 영상을 제작하는 것으로부터 시작된다. 제작된 모의 영상 쌍으로부터 구해진 DEM을 가상의 실제 값과 비교하면 구해진 DEM의 정량적인 오차 분석이 가능하며, 적용된 3차원 영상 해석 기법의 유효성이 평가될 수 있다. 제안된 평가 방법의 타당성을 검증하기 위해, 정량적 및 정성적인 실험이 수행되었다. 이를 위해 발생하는 모의 영상이 실제 형상을 재현하는 정도를 정량적인 수치로서 구하여 제안된 방법을 타당성을 입증하였다. 또한 정합창의 크기 변화에 따른 DEM의 정확도를 제안된 평가 방법에 의해 실험하였다. 이러한 실험 결과가 예견된 결과와 일치함에 의해 제안된 평가 방법의 타당성을 정성적으로도 명백히 증명하였다.

Key words : DEM, 3D reconstruction, image analysis, ortho-image, synthetic image

* Dept. of Electronics Eng., Myonji University
dmwoo@mju.ac.kr TEL: 031-330-6752

★ Corresponding author

※ Acknowledgment: This work was supported by National Research Foundation of Korea Grant funded by the Korean Government (2012-004950).

Manuscript received Dec. 4, 2012; revised Feb. 14, 2013 ; accepted Feb. 22, 2013

1. 서론

스테레오 정합에 의한 3차원 재구성에 관해 많은 연구가 수행되어 왔다[1-6]. 다 해상도 기법[5], NCC(Normalized Cross-Correlation), NSSR (Narrow

Search Sub-pixel Registration)[6] 등의 방법들에 의한 현재의 스테레오 정합 기술은 매우 정교한 3차원 재구성을 실현할 수 있는 수준에 도달하였다. 그럼에도 불구하고 스테레오 정합 과정에는 가려짐(occlusion), 반복적인 패턴, 정합창 내에 현저한 특징이 없는 현상 등의 요인에 의한 정합 오류가 있을 수 있다. 따라서 이러한 3차원 재구성 과정에 의해 구성된 DEM(Digital Elevation Map) 형태의 3차원 모델의 신뢰도를 평가하기 위해, 수행된 3차원 재구성 과정의 정량적인 평가는 매우 중요하다.

3차원 재구성 과정의 정확도를 판정하는 작업은 매우 어려운 작업이다. 가장 많이 사용되는 방법은 관심의 대상이 되는 영역의 지형 좌표를 측정하여 3차원 재구성에 의해 구해진 DEM과 비교하는 기법이다. 이러한 실측치와 비교하는 방법의 가장 큰 문제점은 수 평방 킬로미터에 존재하는 수치고도를 매 격자점마다 정밀하게 측정하는 것이 매우 어렵다는 점이다. 레이저나 IFSAR(Interferometric Synthetic Aperture Radar)와 같은 고성능 계측 시스템을 사용하더라도, 수 평방 km의 영역에 대한 수치고도의 고해상도 행렬을 만드는 것은 현실적으로 불가능하다.

간접적으로 3차원 재구성 과정의 정확도를 판정하는 방법의 하나는 DEM의 자기 일치성(Self-Consistency)[7]을 이용한 방법이다. Leclerc에 의해 제안된 이 방법은 2개의 겹쳐진 영상기준 영상과 목표 영상으로 지정할 때, 그 역할을 반대로 하여 2개의 다른 DEM이 발생될 수 있는데, 이렇게 발생된 DEM이 서로 일치되지 않는 경우는 오차가 많다고 판정될 수 있다. 이러한 자기 일치성의 이론은 DEM의 간접적인 오차의 측정이나 정합 오류의 검출[8] 등에 효율적으로 적용될 수 있다. 그러나 이 방법의 가장 큰 문제점은 정량적인 오차의 크기를 구할 수 없다는 것이다.

통계학적인 방법에 의해 DEM의 정확도를 추정하는 방법[8]이 제안되었는데, 중간값, 정규 중간값, 편차의 절대값 등의 통계학적 값을 이용하여 outlier에 의한 오류값을 추정하는 기법이다. 그러나 실제 스테레오 정합에서는 정합오류에 의한 outlier뿐만 아니라 여러 가지 체계적인 오류들도 많이 포함되므로, 이러한 기법에 의해 스테레오 정합과정을 완전히 평가할 수는 없다. DEM 오류가 지형의 형태, 샘플링 밀도 및 보간 방법과 상관관계가 있다는 가정하에 제안된 Hu에 경험적인 DEM 오류 연구[9]는 근사화 기법에 의해 DEM의 오류를 평가하였다. DEM 발생에 널리 사용되는 3가지 선형보간 방법을 분석하여 DEM에 누적되는 보간의 오류를 추정하였으나, 이런 기법도 DEM을 발생하는 3차원 재구성 과정과 DEM의 직접

적인 정확도 분석은 제시할 수 없다.

이런 맥락에서 본 논문에서는 모의 영상 발생에 의한 새로운 3차원 재구성 과정의 정확도 평가 방법을 제안하였다. 우리가 미리 확보하고 있는 DEM과 정사영상이 있다면, 이들을 실제값(ground truth)으로 가정한다. 이렇게 가정된 DEM과 정사영상으로부터 ray tracing 기법에 의해 모의 영상을 제작할 수 있는데, 모의 영상으로부터 평가하고자하는 3차원 재구성 과정에 의해 구해진 DEM을 구성한다면, 이 DEM의 실제값은 모의 영상을 만드는데 사용되었던 DEM이며, 이 DEM과의 비교를 통해 정량적인 오차 분석이 가능하다. 이를 위해 본 논문에서는 주어진 DEM과 정사영상으로부터 모의 영상을 구성하는 모의 영상 발생기가 구성되었다.

제안된 정확도 평가 방법의 유효성을 입증하기 위해 정량적인 실험과 정성적인 실험을 수행하였다. 정량적인 실험은 발생하는 모의 영상이 원 영상과 같은 형태로 재현되는 지를 정량적으로 평가함에 의해 본 모의 영상 제작 기법의 유효성을 평가하였다. 또한 정성적인 실험은 3차원 재구성에 있어서 윈도우의 크기가 미치는 영향[10]이 제안된 평가기법에 의해 반영되는 지를 실험하여 제안된 평가 방법의 타당성을 검증하였다.

II. 3차원 재구성

제안된 3차원 재구성 과정의 정량적 평가 방법을 입증하기 위해서는 기본적인 3차원 재구성 시스템이 필요하다. 이를 위해 기본적인 3차원 재구성 시스템이 구성되었으며, 스테레오 정합을 위해서는 현재 널리 사용되는 다 해상도 기법, NCC(Normalized Cross-correlation), NSSR(Narrow Search Sub-pixel Registration)을 채용하였다.

1. NCC

NCC(Normalized Cross Correlation)는 스테레오 영상정합의 기본적인 방법으로 epipolar sampling에 의해 resampling된 영상에서 불일치(disparity)를 구하는 과정이다. 기준 영상이 $R(i, j)$ 이고 목표 영상이 $T(i, j)$ 로 가정될 때, 불일치는 수평축에서만 발생되어, 식 (1)을 만족하는 불일치 map이 구해져야 한다.

$$R(i, j) \leftarrow T(i + D_i(i, j), j) \quad (1)$$

여기서 $D_i(i, j)$ 는 불일치 맵이다.

위의 식을 이용하여 불일치 map을 구할 때 불일치 값을 정하는 방법은 $N \times N$ 윈도우에서 상호 상관 방법의 계수값이 최대인 지점으로 불일치 값을 정하게 된다. 윈도우 내 화소의 밝기에 무관한 상호 상관을 구하는 식은 다음과 같다.

$$\rho(i, j, \delta_i) = \frac{Covar[R(i, j), T(i + \delta_i, j)]}{\sqrt{Var[R(i, j)] \cdot Var[T(i + \delta_i, j)]}} \quad (2)$$

여기서 $Var[R(i, j)]$ 은 기준영상에서 화소좌표가 (i, j) 를 중심으로 $N \times N$ 윈도우 내부 화소 값의 분산이고, $Var[T(i + \delta_i, j)]$ 은 목표영상에서 화소좌표가 $(i + \delta_i, j)$ 를 중심으로 $N \times N$ 윈도우내부 화소 값의 분산이다.

$Covar[R(i, j), T(i + \delta_i, j)]$ 는 기준영상의 (i, j) 와 목표영상의 $(i + \delta_i, j)$ 좌표를 중심으로 $N \times N$ 윈도우 내부 화소 값의 covariance값이다.

$$\begin{aligned} Var[R(i, j)] &= \frac{1}{N-1} \left[\sum_{ii=i-(N-1)/2}^{i+(N-1)/2} \sum_{jj=j-(N-1)/2}^{j+(N-1)/2} A_1^2 \right] \\ Var[T(i + \delta_i, j)] &= \frac{1}{N-1} \left[\sum_{ii=i-(N-1)/2}^{i+(N-1)/2} \sum_{jj=j-(N-1)/2}^{j+(N-1)/2} A_2^2 \right] \\ Covar[R(i, j), T(i + \delta_i, j)] &= \frac{1}{N-1} \left\{ \sum_{ii=i-(N-1)/2}^{i+(N-1)/2} \sum_{jj=j-(N-1)/2}^{j+(N-1)/2} A_1 \cdot A_2 \right\} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} A_1 &= R(ii, jj) - E[R(i, j)] \\ A_2 &= T(ii + \delta_i, jj) - E[T(i + \delta_i, j)] \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 $E[R(i, j)]$, $E[T(i + \delta_i, j)]$ 는 기준 영상과 목표 영상 내부 $N \times N$ 윈도우 화소 값의 평균이다.

$$\begin{aligned} E[R(i, j)] &= \frac{1}{N} \left[\sum_{ii=i-(N-1)/2}^{i+(N-1)/2} \sum_{jj=j-(N-1)/2}^{j+(N-1)/2} R(ii, jj) \right] \\ E[T(i + \delta_i, j)] &= \frac{1}{N} \left[\sum_{ii=i-(N-1)/2}^{i+(N-1)/2} \sum_{jj=j-(N-1)/2}^{j+(N-1)/2} T(ii + \delta_i, jj) \right] \end{aligned} \quad (5)$$

위의 식들에 의해 결정된 탐색 구간 중 상호 상관이 가장 큰 δ_i 를 구하여 불일치 map $D_i(i, j)$ 를 결정한다.

2. 다 해상도 기법

다 해상도 기법은 영상의 해상도를 그림 1과 같이 역 피라미드의 형태로 줄여나가면서 해상도가 가장 낮은 영상에서부터 정합하여 해상도가 가장 좋은 영상까지 변환하면서 정확한 불일치를 결정하는 방법이다. 일반적인 영상의 경우 특징이 큰 것은 불일치가 크고 특징이 작은 물체는 불일치가 작다. 그러므로 해상도가 낮아지게 되면 특징이 작은 영역은 사라지게 된다. 그러나 고해상도에서는 특징이 작은 영역이 복원되기 때문에 불일치를 결정할 수 있다. 이러한 원리를 이용하여 해상도를 변환하면서 불일치를 결정하면 가장 정확한 불일치를 결정 할 수 있다.

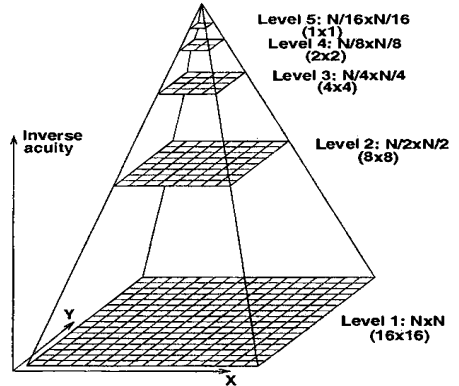


그림 1. 다해상도 기법

Fig. 1. Multi-resolution scheme

3. NSSR

탐색 영역에서의 상호 상관 값을 LSEE(Least Squared Error Estimation)에 의해 2차함수 곡선으로 fitting하여 최대값을 추정하는 방법인 NSSR을 채용하였다. 정확한 fitting을 위해 많은 데이터가 필요하므로, 그림 2에 나타난 바와 같이 분수 단위의 불일치 지점에서의 상호 상관 값을 목표 영상을 resampling하여 추가로 구하여 정확한 fitting을 수행한다. 일반적인 fitting 함수의 형태는 포물선이나 Gaussian이 사용되어 질 수 있다. 본 논문에서 채용된 방법에서는 2차 포물선 모델 $y = ax^2 + bx + c$

의 형태로 정의하였다. 여기서 X 는 불일치 값을 나타내며 Y 는 그에 대응하는 상호 상관 값이다. 계수 a, b, c 를 추정하기 위해서 각 X 값에 해당하는 Y 값을 대입하여 LSEE를 수행한다. 각각의 데이터를 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$ 로 나타내면, 각 점을 지나는 2차 포물선 방정식은 아래의 식과 같다.

$$\begin{aligned} ax_1^2 + bx_1 + c &= y_1 \\ ax_2^2 + bx_2 + c &= y_2 \\ &\vdots \\ ax_n^2 + bx_n + c &= y_n \end{aligned} \tag{6}$$

$$\vec{X} = \begin{bmatrix} x_1^2 & x_1 & 1 \\ x_2^2 & x_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n^2 & x_n & 1 \end{bmatrix} \quad \vec{A} = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad \vec{Y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} \tag{7}$$

$$\begin{aligned} \vec{X}\vec{A} &= \vec{Y} \\ \vec{X}^T\vec{X}\vec{A} &= \vec{X}^T\vec{Y} \\ \vec{A} &= (\vec{X}^T\vec{X})^{-1}\vec{X}^T\vec{Y} \end{aligned} \tag{8}$$

식 (8)에 의해 결정된 a, b, c 로부터, 최적의 불일치 지점은 최대 극점으로서 $\delta_0 - \frac{b}{2a}$ 로서 구해진다. 여기서 δ_0 는 초기 불일치이다. 또한 식 (8)에서 행렬 $\vec{X}^T\vec{X}$ 는 미지 변수보다 식이 훨씬 더 많은 경우로부터 발생되므로 이 행렬의 모든 벡터는 선형 독립이며 역행렬은 항상 존재한다.

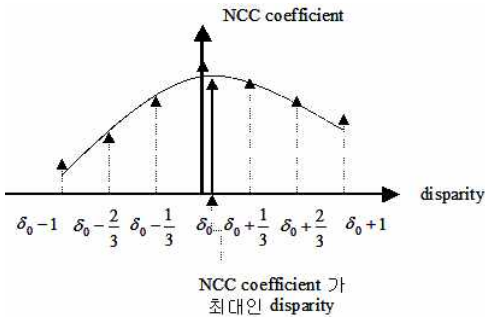


그림 2. 2차 함수 최적화 모델
Fig. 2. Parabolic function fitting model

III. 모의 영상 발생

미리 확보된 DEM과 정사영상으로부터 모의 영상을 재현하기 위한 일련의 과정이 구현되었다. 이를 위해 주어진 DEM으로부터 인접한 격자점의 수치고도를 삼각 평면의 요소들로 구성된 선형 3차원 모델을 가정한다. 모의 영상의 화소 값을 결정하기 위해 화소의 좌표와 카메라의 중점을 잇는 직선에 가장 가깝게 교차되는 삼각 평면 요소와 교점을 그림 3과 같이 구하고, 교점의 수평 좌표인 x, y 점에 상응하는 정사영상의 계조도를 구하는 모의 영상 제작 기법을 개발하였다.

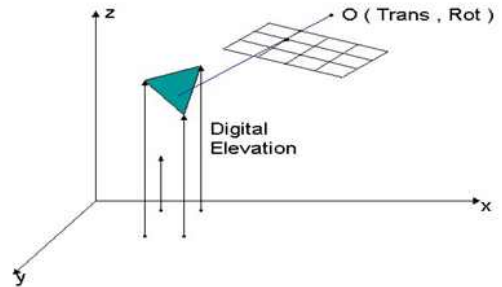


그림 3. 모의 영상 제작 기법
Fig. 3. Synthetic image generation

카메라의 중점 $O = (x_0, y_0, z_0)$ 으로부터 시작하여 구하는 화소의 좌표 $P = (x_p, y_p, z_p)$ 를 지나는 직선의 매개 변수 t 를 이용한 직선방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} x - x_0 &= t(x_p - x_0) \\ y - y_0 &= t(y_p - y_0) \\ z - z_0 &= t(z_p - z_0) \end{aligned} \tag{9}$$

여기서 매개 변수 t 는 투영되는 물체가 투영면 앞에 존재해야하므로 $t > 1$ 로 제한된다.

윗 식의 직선방정식과 교차되는 삼각 평면 요소를 구하기 위해 교차 검사가 수행된다. 매 격자점에서 시작되는 삼각 평면 요소는 2개이다. 즉 격자점 (i, j) 에서 시작되는 삼각 평면 요소는 격자점 $(i, j), (i, j+1), (i+1, j+1)$ 의 실제 수치고도 좌표로 구성되는 것과 격자점 $(i+1, j+1), (i+1, j), (i, j)$ 의 실제 수치고도 좌표로 구성되는 것의 2개가 존재한다. 따라서 $M \times N$ 의 해상도를 가지는 DEM은 총 $2(M-1)(N-1)$ 개의 삼각 평면 요소가 존재한다. 그러나 하나의 화소 값을 결정하기 위해 모든 $2(M-1)(N-1)$ 개의 삼각 평면 요

을 재현하였다.

그림 5는 원 영상 중 기준 영상과 이를 역으로 재현한 모의 영상이다. 2개의 원 영상의 겹쳐진 부분에서만 DEM과 정사영상을 통해 모의 영상이 제작되었기 때문에 일부 가장자리 영역에서는 발생되지 않은 것을 제외하고는 원 영상과 모의 영상이 매우 유사하

게 관측되었다. 이를 더 자세히 검사하기 위해 한 부분을 자세히 확대한 결과가 그림 6이다. 화소 단위의 비교가 가능한 확대 영상에서는 원 영상과 모의 영상이 화소 단위로도 그 형태가 일치함을 알 수 있다. 재현된 모의 영상이 약간 희미하게 나타난 이유는 정사영상 제작 및 모의 영상 제작에 있어서 많은 보간이 수행되었기 때문이다.

모의 영상이 원 영상에 유사하게 재현되는 정도를 II장의 정합 방법에 의해 정량적으로 분석하였다. 모의 영상과 원 영상간의 불일치를 구하게 되면 모의 영상이 원 영상으로부터 어느 정도의 정확도로 일치되는 가를 판별할 수 있는데 이를 위해 스테레오 정합 기법 중에서 다해상도 기법 및 NCC와 NSSR을 이용하여 정확한 불일치를 구하였다.

표 1은 NCC 기법에서 자기상관을 계산하는 정합창의 크기에 따른 오차를 나타낸 것이다. 오차 중에서 e1과 e2는 불일치의 절대값과 rms 평균으로부터 구한 오차로서 거의 화소 크기의 5% 이내의 오차를 보여 모의 영상이 원래 형태에 매우 유사함을 알 수 있다. 자기 상관을 계산하는 창이 크기가 증가함에 따라 e1과 e2 오차가 감소하는데 이는 창이 크기가 클수록 화소 한 두 개의 값에 영향을 덜 받고 전반적인 형태에 의해 좌우되기 때문이다. rms 평균치인 e2가 절대

표 1. 원 영상과 모의 영상간의 불일치 d로부터 구한 오차 (단위: 화소 크기)

Table 1. Error evaluated from disparity d between original image and synthetic image (unit: pixel size)

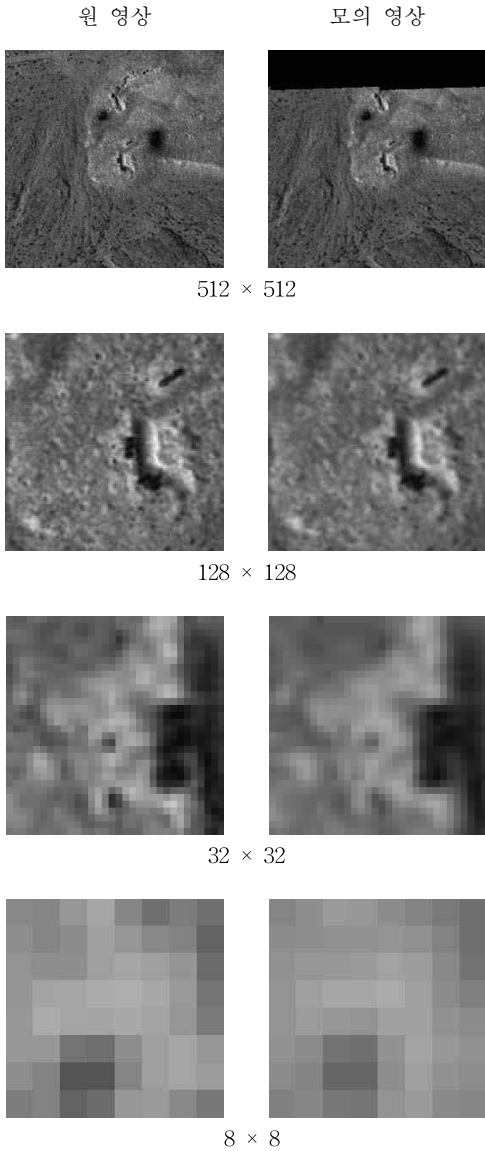


그림 6. 원 영상과 모의 영상의 시각 검사
Fig. 6. Visual inspection of original image and synthetic image

NCC 창이 크기	오 차			
	e1 = E[d]	e2 = √E[d ²]	e3 = E[d]	e4 = √E[(d-e3) ²]
9 x 9	0.04557	0.06043	-0.00086	0.06042
11 x 11	0.03501	0.04654	-0.00106	0.04653
13 x 13	0.02787	0.03683	-0.00113	0.03682
15 x 15	0.02304	0.03048	-0.00111	0.03046
17 x 17	0.01942	0.02559	-0.00116	0.02556
19 x 19	0.01689	0.02223	-0.00112	0.02220

값 평균치인 $e1$ 보다 약간씩 큰 값을 나타내는데 이는 3차원 재구성에 의해 DEM이 구성될 때 가려짐 등의 요인에 의해 지역적인 오류에 의한 것으로 분석된다.

표 1의 오차 중에서 $e3$ 는 모의 영상이 원 영상에 비해 전반적으로 얼마나 위치가 벗어나 있는 가를 나타낸다. 이 값은 정합창의 자기 상관관을 계산하는 정합창의 크기와는 무관하게 나타났으며, 화소 크기의 약 0.1%정도의 크기를 보여 구해진 모의 영상이 원래 형상을 거의 완벽히 재현함을 보인다. $e4$ 는 원 영상과 모의 영상 간의 불일치의 표준 편차로서 $e3$ 값이 매우 적게 나타나므로, 거의 $e2$ 와 비슷한 값을 보여 주었다.

V. 정성적인 실험

제안된 평가 방법의 유효성을 입증하기 위한 실험의 일환으로 DEM의 정확도에 관련하여 일반적으로 예견될 수 있는 사실이 본 평가 방법에 의해 적절히 나타나는 지를 분석하였다. 본 실험에서 적용되는 예견될 수 있는 사실은 3차원 재구성에 있어서 자기 상관관을 계산하는 정합창의 크기에 따른 DEM 정확도 [11]에 관한 것이다.

보통 정합창의 크기가 커질수록 투영 왜곡(perspective distortion)은 더 커질 수밖에 없다. 그 이유는 두 영상이 정합창의 중심에서 정확히 정렬되었다 하더라도 정합창 내의 다른 화소들은 정렬되지 않을 수 있으며, 중심에서 먼 화소일수록 정렬 오차가 더 커지기 때문이다.[12] 이러한 투영 왜곡에 의한 3차원 재구성 오차는 DEM에서 전반적으로 나타나게 된다. 그러나 이러한 투영 왜곡을 줄이기 위해 정합창의 크기를 줄일 수만은 없다. 정합창의 크기가 작아 질수록 정합창 내에 특징이 없거나, 반복적인 무늬 등에 의한 정합 오류의 발생 빈도가 증가하기 때문이다. 이러한 정합 오류는 3차원 재구성에 있어서 spike 형태의 국지적이고 매우 큰 오차를 발생한다.

따라서 정합창의 크기에 따른 DEM 정확도 평가를 제안된 평가 방법에 의해 수행하였다. 본 연구에서 채용한 스테레오 정합 기법이 다 해상도 방식이므로 해상도의 각 단계마다 다른 정합창의 크기를 적용할 수 있으나, 이는 본 연구의 연구 범위를 벗어나므로 매 단계마다 동일한 정합창의 크기로서 3차원 재구성 실험을 수행하였다. 또한 본 실험을 위하여 기존의 확보된 DEM과 정사영상은 가능한 한 평탄한 지역의

것으로 선정하였다. 굴곡이 많은 지형은 가려짐이 많이 발생되어 본 실험에서의 결론을 왜곡시킬 수 있기 때문이다. 그림 7의 (a)와 (b)는 실험에서 실제 값으로 가정되는 DEM과 정사영상이다. 그림 7의 (b)에 표시된 2개의 윤곽선은 모의 영상이 구성되는 투영면이며 그림 7의 (c)와 (d)가 이렇게 제작된 한 쌍의 모의 영상이다.

그림 8은 제작된 모의 영상으로부터 정합창의 크기를 변화시키면서 3차원 재구성을 수행하여 DEM을 구한 결과이다. 그림에서 정합창의 크기가 가장 작

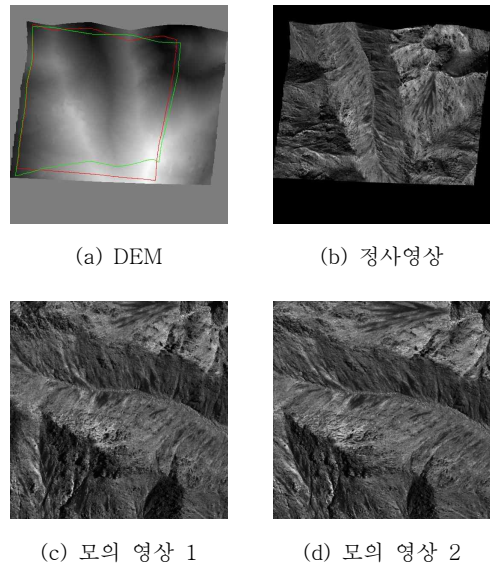


그림 7. 모의 영상의 구성

Fig. 7. Synthetic image generation

은 경우인 9×9 에서 가장 많은 spike 형태의 오류가 관측되며, 정합창의 크기가 커질수록 이러한 오류의 양이 줄어드는 것을 알 수 있다. 이러한 spike 형태의 오류는 스테레오 정합 과정에서 구한 불일치 값 중에서 주변의 불일치의 중간 값(median)과 현저한 차이를 보이는 것을 spike를 발생하는 불일치로 검출할 수 있으며, 이를 주변의 값에 의해 보간된 값으로 대체 하게 되면 spike를 제거할 수 있다. 그림 9는 이러한 중간값 보간에 의한 spike 제거를 한 3차원 재구성의 결과를 나타낸다. 결과 DEM에서는 spike 형태의 오류가 완전히 제거된 상태로 나타났으며, 정합창의 크기가 가장 큰 19×19 인 경우에는 9×9 에 비해 전반적으로 부드러운 형태로 관측된다.

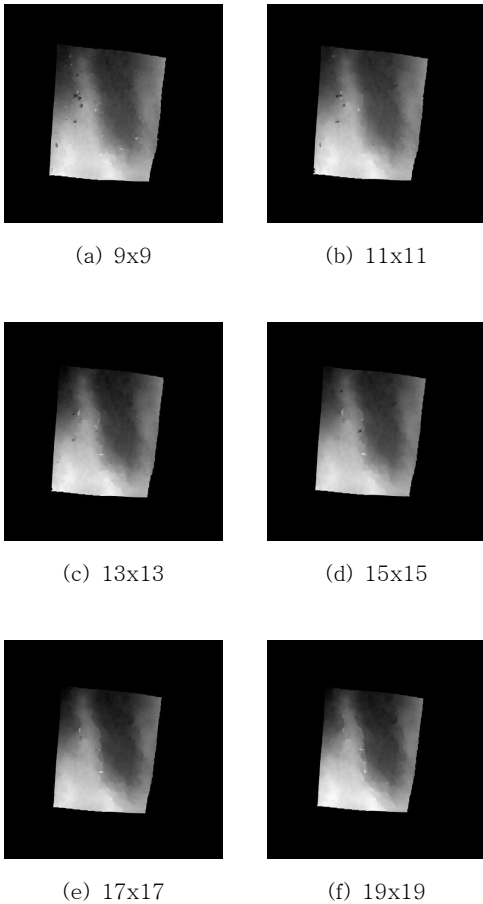


그림 8. 3차원 재구성 결과 DEM
Fig. 8. DEM generated by three dimensional reconstruction

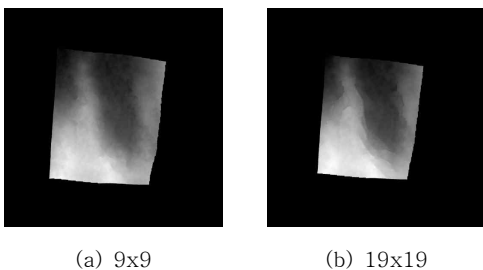


그림 9. spike 제거를 이용한 3차원 재구성 결과 DEM
Fig. 9. DEM generated by three dimensional

reconstruction including spike elimination

표2는 NCC 창의 크기를 변화하면서 구한 제안된 DEM의 정량적 정확도 평가의 결과이다. 정확도 평가를 위해 계산된 값은 평균 오차와 rms 오차로서 평균 오차는 DEM의 전반적인 오차의 정도를 나타내는

표 2. 실제값과의 차이 e로부터 구한 DEM 오차 (단위: meter)

Table 2. DEM error evaluated from the difference e between the result and ground truth (unit: meter)

NCC 창의 크기	spike가 포함된 DEM 오차		spike가 제거된 DEM 오차	
	평균오차 $E[e]$	rms오차 $\sqrt{E[e^2]}$	평균오차 $E[e]$	rms오차 $\sqrt{E[e^2]}$
9 x 9	0.337733	1.311774	0.204980	0.365548
11 x 11	0.340495	1.060019	0.260392	0.452575
13 x 13	0.364696	0.863924	0.315674	0.535606
15 x 15	0.428795	0.975971	0.381458	0.646191
17 x 17	0.491957	0.964200	0.463993	0.797337
19 x 19	0.560241	1.043378	0.540334	0.931272

데 반해서, rms 오차는 부분적으로 크게 나타나는 spike 형태의 오차를 많이 반영한다. spike 제거 없이 구한 DEM의 평균오차는 정합창의 크기가 작은 경우에는 창의 크기가 커지더라도 큰 변화가 나타나지 않는데 이는 정합창이 작을 때는 발생하는 spike 형태의 오차가 크기 때문이다. 부분적으로 크게 나타나는 오차의 영향을 많이 받는 rms 오차의 경우는 오히려 정합창의 크기가 제일 작은 9x9에서 가장 크게 나타났으며, 정합창의 크기가 13x13인 경우 가장 작게 나타났다. 3차원 재구성 과정에서 spike 형태의 정합 오류를 제거한 DEM의 경우는 정합창의 크기 증가에 따라 단조 증가하는 양상을 보여 주고 있다. 이 경우의 오차는 대부분 투영 왜곡에 기인하므로, 투영 왜곡에 의한 오차는 정합창의 크기에 따라 증가한 것으로 분석된다. 이러한 제안된 평가 방법에 의한 상기 분석 결과들은 당초 예견된 사실과 일치되어, 본 논문에서 제안한 평가 방법의 당위성을 명백히 입증하였다.

IV. 결론

모의 영상 발생에 의한 정량적인 3차원 재구성 과정의 평가 방법이 제안되었다. 제안된 평가 방법의 의해서 DEM을 발생시키는 3차원 재구성 과정의 유효성을 적절히 검증할 수 있으므로, 이러한 과정에 의해 구해진 DEM의 신뢰도를 확보하는데 중요하게 사용될 수 있다.

제안된 평가 방법을 정량적 및 정성적 방법으로 실험한 결과, 그 타당성이 명백히 입증되어, 그 활용도가 매우 높을 것으로 기대된다. 또한 정성적 실험에서 적용되었던 정합창의 크기에 따른 DEM의 오차 분석에 따라 spike 형태의 정합 오류를 발생하지 않는 한 정합창의 크기가 최소화하는 것이 가장 정확한 3차원 지형 모델을 구축할 수 있음을 실험적으로 증명하였다. 따라서 이의 후속 연구로서 정합창 최소화 기법을 이용한 고 정도의 3차원 재구성 시스템의 구성이 실험 중이다.

References

- [1] T. Kanade and M. Okutomi, "A stereo matching algorithm with an adaptive window: theory and experiment," *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 16, no.9, pp. 920-932, 1994.
- [2] N. Ayache and B. Faverjon, "Efficient registration of stereo images by matching graph description of edge segments," *Int'l J. Computer Vision*, pp. 107-131, 1987.
- [3] P. Agouris and T. Schenk, "Automates aerotriangulation using multiple image multipoint matching," *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. LXII, no.6, pp. 703-710, 1996.
- [4] P. Fua and Y. G. Leclerc, "Taking advantage of image based and geometry based constraints to recover 3D surfaces," *Computer Vision and Image Understanding*, vol.64, no.1, pp.111-127, 1996.
- [5] M. Hannah, "A system for digital stereo image matching," *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol.55, no.12, pp.1765-1770, 1989.
- [6] D. J. Panton, "A flexible approach to digital stereo mapping," *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol.44, no.12, pp.1499-1512, 1978.

- [7] Y. G. Leclerc, Q. Luong and P. Fua, "Self-consistency: a novel approach to characterizing the accuracy and reliability of point correspondence algorithms", *Proc. Image Understanding Workshop*, pp. 793-807, 1998.
- [8] Joachim Hohle and M. Hohle, "Accuracy assessment of digital elevation models by means of robust statistical methods," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, no. 64, pp. 398-406, 2009.
- [9] P Hu, X. Liu and H. Hu, "Accuracy assessment of digital elevation models based on approximation theory," *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol.75, no.1, pp. 49-56, 2009.
- [10] H. Schultz, D. Woo, E. Riseman and F. Stolle, "Error detection and DEM fusion using self-consistency," *IEEE Int. Conf. on Computer Vision*, Vol. 2, pp. 1174 -1181, 1999
- [11] H. Mostafavi, "Image correlation with geometric distortion part II: effects on local accuracy," *IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems*, vol. AES-14, no. 13, pp. 494-500, 1978.
- [12] H. Schultz, "Terrain reconstruction from widely separated images," *Proceeding of SPIE*, vol. 2486, pp. 113-122, 1995.

BIOGRAPHY

Dong-Min Woo (Member)



1980 : BS degree in Electronic Engineering, Yonsei University.
 1982 : MS degree in Electronic Engineering, Yonsei University.
 1987 : PhD degree in Electrical Engineering, Case Western Reserve University.
 1990~present : Professor, Myongji University