

연속 항공영상의 스테레오 모델링에 의한 지형 복원

(Recovering the Elevation Map by Stereo Modeling of the Aerial Image Sequence)

姜旻錫*, 金俊植**, 朴來弘**, 李奭熙**

(Min Seok Kang, Joon Seek Kim, Rae-Hong Park and Kwae Hi Lee)

要約

본 논문에서는 연속 항공영상을 이용한 지형정보의 복원에 관하여 기술하였다. 먼저 연속 항공영상을 스테레오 영상으로 모델링하였으며 또한 비행계기값을 이용하여 영상을 보정하였다. 스테레오 정합에서는 영역기반 방법을 항공영상에 적용하였으며 정합에 중요한 영향을 미치는 여러가지 변수들을 실험적으로 알맞게 결정하였다. 깊이정보 추출에서는 공면조건을 만족시키지 않는 정합점들에 대해서 벡터방정식을 세워서 공간상에서 깊이를 결정하였다. 또한 기존의 특징기반 방법을 항공영상에 적용하여 결과를 비교하였다. 마지막으로 복원된 지형의 성능평가 방법에 관하여 논하였다. 복원된 지형을 등고선으로 나타내어 지도의 등고선과 비교하였으며 지도와 영상에서 쉽게 표기가 가능한 지역에서는 고도값을 직접 비교하여 성능평가를 하였다. 실험결과 제안된 방법이 좋은 결과를 보임을 알 수 있었다.

Abstract

This paper proposes a recovering technique of the elevation map by stereo modeling of the aerial image sequence which is transformed based on the aircraft situation. The area-based stereo matching method is simulated and the various parameters are experimentally chosen. In a depth extraction step, the depth is determined by solving the vector equation. The equation is suitable for stereo modeling of aerial images which do not satisfy the epipolar constraint. Also, the performance of the conventional feature-based matching scheme is compared. Finally, techniques analyzing the accuracy of the recovered elevation map (REM) are described. The analysis includes the error estimation for both height and contour lines, where the accuracy is based on the measurements of deviations from the estimates obtained manually. The experimental results show the efficiency of the proposed technique.

1. 서론

* 準會員, ** 正會員, 西江大學校 電子工學科
(Dept. of Elec. Eng., Sogang Univ.)
(※ 본 연구는 국과연 기초연구비 지원에 의해 이루어진 것임)

接受日字: 1992年 12月 2日

INS (Inertial Navigation System), TACAN (Tactical Air Navigation), LORAN (Long Range Navigation) 등과 같은 기존의 항법시스템과는 달리 영상처리 (image processing) 기술의 발

달은 비행체 독자적으로 비행이 가능하며 가격이 저렴한 영상항법 시스템의 구현을 가능하게 하였다. 영상항법 시스템은 비행체에 장착된 지면 방향의 카메라를 거쳐 받아들인 연속 항공영상으로부터 상대적 편이 (shift vector)를 구한 뒤, 시스템이 이미 가지고 해당 지역의 지형 데이터 베이스를 이용하여 지상에서의 비행체의 현재 위치와 비행속도를 추정해내는 시스템이다.^{1,2)}

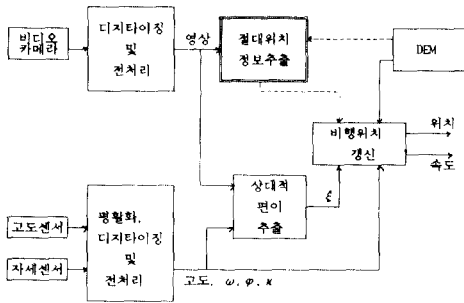


그림 1. 영상항법 시스템 개략도
Fig. 1. Blockdiagram of a visual navigation system.

그림 1에 영상항법 시스템의 개략도를 보였다. 영상항법 시스템의 입력부는 항공영상을 취득하는 부분과 비행 계기값을 알아내는 부분으로 구성되어 있다. 항공 영상은 비행체에 장착된 비디오 카메라로부터 취득하여 디지털화 과정을 거쳐 얻으며 비행 계기값은 디지털 신호로 직접 입력될 수도 있으나 본 논문의 경우는 영상으로 취득하여 입력하였다. 중앙처리부에서는 두 연속 영상에서 상대적 편이³⁾를 찾아낸 후 DEM (Digital Elevation Model)을 이용하여 현재 위치를 알아낸다. 이 시스템에서 비행위치 갱신에는 Kalman 필터를 사용하는데 오랜 비행시에는 오차가 누적되는 단점을 가지고 있다. 그러므로 일정시간 비행 후에 비행체의 절대위치를 보정해주는 시스템이 필요하다. 본 논문에서 구현한 절대위치 보정 시스템은 연속 항공영상과 비행 지역의 DEM을 사용하였으며 영상처리 기술중 스테레오 비전 (stereo vision) 기술을 응용하였다.

Rodríguez와 Aggarwal⁴⁾은 DEM으로부터 항공영상을 합성하여 지형정보를 복원해내었다. 그러나 이러한 연구는 실험실 영상에 한정되어 있으며 실제 비행체에서 취득된 연속 항공영상을 이용하여 지형정보를 복원해낸 연구는 거의 없었다. 본 논문에서는 실제 항공영상을 사용하여 지형을 복원했으며 Rodríguez와 Aggarwal이 사용한 특징기반 정합 방

법은 실제 항공영상에는 적당하지 않다는 점을 밝히고 본 논문에서는 영역기반 정합 방법을 사용하여 항공영상을 정합하였다.

복원된 지형을 등고선으로 나타내어 지도의 등고선과 비교하여 성능평가를 행했으며 구분이 가능한 지점에 대해서는 절대고도 값을 비교하여 성능평가를 하였다. 실험결과, 연속 항공영상을 스테레오 모델링하여 복원된 지형은 절대고도 값은 지도와 약간의 차이를 가지고 있지만 전체적인 윤곽은 지도가 나타내는 지형과 거의 유사하게 복원됨을 알 수 있었다.

본 논문의 가장에서는 연속 항공영상의 스테레오 모델링에 대해 서술하였으며, 가장에서는 항공영상의 스테레오 정합에 대해서, 가장에서는 공면조건을 만족하지 않는 정합점들의 깊이정보 추출에 관하여 서술하였다. 그리고 가장에서는 여러 항공영상에 적용한 제안한 방법의 실험결과를 보였고 가장에서는 결론을 맺었다.

II. 연속 항공영상의 스테레오 모델링

스테레오 비전은 사람이 두개의 눈을 가지고 물체를 바라봄으로써 원근을 판단하고 물체를 구분하는 시각적 특징을 이용하여 두 장의 영상에서 3차원 깊이정보를 취득하는 것이다. 스테레오 비전에는 두 장의 영상을 얻는 영상취득, 영상취득시의 카메라 모델링, 두영상 동일점을 알아내는 스테레오 정합, 최종 단계인 깊이정보 추출 등의 단계가 있다. 스테레오 비전의 여러 단계 중에서 스테레오 정합이 많이 연구되고 있으나 실험실 영상이 아닌 실제 영상에 있어서는 절단계인 영상취득과 카메라 모델링^{5,6)}도 중요한 문제이다.

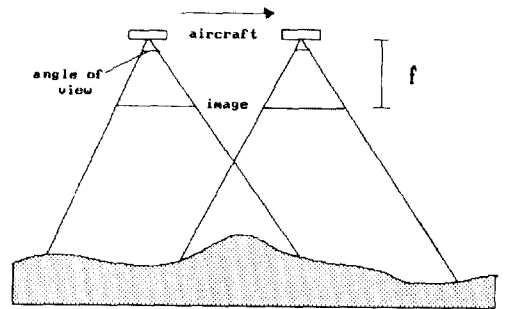


그림 2 비행체의 움직임에 따른 영상취득
Fig. 2. Image acquisition based on the motion of an aircraft.

그림 2는 비행체의 움직임과 영상 취득과정을 보여

주고 있다. 비행체가 이동하며 영상을 취득하게 되므로 두 영상에서 같은 지역이 다른 위치로 이동하는데 이전 영상에 대해서 비행방향과 반대쪽으로 이동되어 다음 영상에 나타난다. 그림 2에서 두 영상에 공통적으로 포함되는 중간 부분의 지형이 이에 해당하며 이러한 겹쳐지는 지역의 지형정보를 알아내는 일이 본 논문의 과제이다.

일반적인 스테레오 영상은 카메라를 한쪽 방향으로 정확히 이동시켜 취득하므로 공선조건을 잘 만족시키며 회전이나 크기 변화 등을 포함하지 않는다. 그러나 실제 비행체에 카메라를 고정시켜 영상을 취득하는 경우 비행체의 움직임에 따라 영상들은 여러 변화를 포함하게 되며 완전한 직선비행을 하면서 roll, pitch, yaw의 움직임이 없는 상황에서 취득되는 영상은 거의 없다. 그러므로 실제 항공영상은 비행체의 여러 자세와 고도변화들을 고려한 3차원 스테레오 모델링이 필요하다.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi \cos \kappa & -\cos \phi \sin \kappa & \sin \kappa \\ \sin \omega \sin \phi \cos \kappa & \cos \omega \cos \kappa & \\ +\cos \omega \cos \kappa & -\sin \omega \sin \phi \sin \kappa & -\sin \omega \cos \phi \\ \sin \omega \sin \kappa & \sin \omega \cos \kappa & \cos \omega \cos \phi \\ -\sin \phi \cos \omega \cos \kappa & +\sin \phi \cos \omega \sin \kappa & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (1)$$

항공영상의 경우 두 스테레오 영상 평면은 평행하지 않게 취득되므로 정합에 앞서 두 영상의 평면이 평행하도록 영상을 변환시켜야 한다. 식 (1)에 roll (ω), pitch (ϕ), yaw (κ)의 값을 대입하여 영상을 변환시킬 수 있다.^[7] 실험에 사용한 영상이 이산화되어 있으므로 새롭게 변환되는 좌표는 실수값으로 변환된다. 그러므로 실제 변환되는 영상은 보간을 거쳐 구성된다. 여기서 X, Y, Z는 기준좌표축이며 x, y, z는 회전된 좌표축이다. 실제 비행 계기값에서 얻을 수 있는 것은 roll, pitch, heading의 값이다. 그러나 식 (1)에 필요한 것은 yaw의 값이므로 heading으로부터 yaw의 값을 유도하였다. 이것은 식 (1)의 행렬을 이용하여 구할 수 있다. Roll, pitch, yaw 성분을 가지고 회전된 비행체의 좌표축에서 x방향의 단위벡터를 절대좌표 평면에 투영했을 때 투영된 벡터와 x축이 이루는 각도가 heading 각도 θ 이므로 여기서 heading과 yaw의 관계를 구한다. 식 (1)에 $x = 1, y = 0, z = 0$ 을 각각 대입하여

$$\tan \theta = \frac{Y}{X} = \frac{\sin \omega \sin \phi \cos \kappa + \cos \omega \sin \kappa}{\cos \phi \cos \kappa} \quad (2)$$

와 같이 구할 수 있다. 이 식에서 yaw 즉 κ 를 구하면

$$\kappa = \tan^{-1} \frac{\tan \theta \cos \phi - \sin \omega \sin \phi}{\cos \omega} \quad (3)$$

와 같다. 실제 영상변환에 있어 roll, pitch를 보정하고 yaw는 증가분만큼만을 보정하였는데 이것은 이전 영상에 비해 다음 영상이 회전된 양만큼만 보정하면 두 영상이 직선비행시 취득되는 영상의 조건을 만족하기 때문이다.

실제 실험에 사용한 영상은 비데오 테이프에 기록된, 항공영상을 1초 간격으로 표본화하여 얻은 256 * 256 크기의 256 그레이 레벨을 갖는 영상이다.

III. 연속 항공영상의 스테레오 정합

연속적으로 취득되는 두장의 항공영상이 스테레오 영상으로 모델링되면 같은 지역을 나타내는 점을 각 영상에서 찾아내어야 한다. 이것은 두 영상에서 정합점을 알아내는 문제로 본질에서는 이러한 스테레오 정합에 관하여 논하였다.

1. 공선조건과 정합 영역의 결정^[8]

스테레오 영상 정합의 전제 조건으로 공선조건이 있다. 공선조건이 만족될 경우 영상의 disparity는 카메라가 움직인 방향으로만 존재하게 되며 두 영상의 매칭쌍 (conjugate pair)은 베이스 라인 (base line)과 평행한 한 직선상에 존재하게 된다. 그러나 실제 실험에 사용한 항공영상은 비행체가 정확히 직선 비행을 하지 않으므로 비행방향이 아닌 방향의 움직임을 가지기 때문에 공선조건을 완전히 만족시키지 않는다. 본 논문에서는 대략적으로 공선조건을 만족시키기 위하여 비행방향이 아닌 방향으로 존재하는 영상의 좌우 움직임을 찾아내어 한쪽 영상을 이동시켰다. 영상의 좌우 움직임을 알아내기 위해서는 영상 전체를 대표할 수 있는 이동을 찾아야 한다. 이것은 영상항법 시스템의 주된 문제인 상대적 편이를 찾아내는 것으로 본 논문에서는 이전 영상에서 최대분산을 갖는 점을 찾아내어 이점을 기준으로 다음 영상과 정합하여 이때 구한 이동만큼 영상을 이동시켜 주는 방법을 제안하였다.^[9] 사람의 시각이 구분이 잘 되는 두드러지는 부분에 대해서는 식별을 잘하는 점을 이용하여 최대분산을 갖는 지역이 영상에서 그러한 특징을 갖는다고 가정한 것이다.

실험에 사용하는 항공 영상은 비행체가 이동하며 취득되므로 각 영상이 전체적으로 겹쳐지지 않고 이전 영상에 존재하던 부분이 없어지기도 하고 다음 영상에서는 새로운 영역이 나타나기도 한다. 정합은 두

영상에서 겹쳐지는 부분에서만 가능하므로 영상 취득 간격이 길어질수록 복원되는 지역은 줄어들며 두 영상의 겹쳐지는 곳은 영상에서 비행방향과 반대방향으로 이동하는 것을 알 수 있다. 본 논문에서는 식 (4)를 제안하여 두 영상에서 겹쳐지는 영역을 결정하였다. 이때 ζ_x , ζ_y 는 최대분산 점을 정합한 결과로 각각 비행방향 및 이와 수직인 방향으로 생기는 편이를 나타내며 다음 영상에서 이전 영상의 정합점의 좌표를 빼서 구하였다.

$$\begin{aligned} row_b &= row_m, & row_c &= 256 - \zeta_x - row_m, \\ col_b &= col_m - \zeta_y, & col_c &= 256 - \zeta_x - col_m. \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 row와 col은 256×256 영상의 행과 열을, 첨자 b와 c는 시작점과 끝점을, m은 여분의 지역을 나타낸다. 이것은 가장자리의 정보가 불분명한 영역과 상대적 편이를 기준으로 정합점들의 편이가 어느 정도 변하더라도 정합에 문제가 없도록 여유지역을 만들어 준 것이다. 이와 같이 이전 영상에서 정합될 영역이 결정되면 최대 분산값을 이용하여 구한 상대적 편이값을 기준으로 설정된 범위에 대해 정합을 행하였다.

2. 기존의 스테레오 정합 방법

이전 영상에서 정합할 영역을 결정하면 그 영역에 속하는 각 화소들이 다음 영상에서 어느 화소에 해당하는 지를 알아내야 깊이 정보를 구해낼 수 있다. 영상의 정합 방법에는 특징기반 (feature-based) 정합 방법과 영역기반 (area-based) 정합 방법이 있다.

특징기반 정합방법은 영상의 특징을 찾아내어 정합하며 나머지 점들에서는 보간을 통하여 깊이를 구한다. 이 방법은 특징을 쉽게 찾아낼 수 있는 영상에는 적합한 방법이지만 항공영상에서는 일정한 특징을 추출하여 정합하기가 쉽지 않다. 기존의 스테레오 정합 방법¹⁹⁾은 영상의 특징을 이용하며 Marr와 Poggio는 인간의 시각특성을 이용하여 스테레오 비전 문제를 푸는 이론적 기반을 마련한 바 있다. 이것은 다음 과정을 통해 구현된다. 먼저 좌우 영상에 대해 12가지 방향의 DoG (Derivative of Gaussian) 필터를 적용하여 각 필터에 대한 영교차점을 찾아낸다. 이러한 영교차점들에 대해 그 부호와 방향정보를 이용하여 정합을 수행한다. 이때 정합은 창들의 크기를 줄여가면서 수행시키며 애매한 점들은 제거하거나 수정하여 정합하며 이렇게 정합한 결과를 2.5차원-sketch라 부른다. Grimson은 이러한 Marr와 Poggio의 이론을 컴퓨터로 구현한 바 있다.²⁰⁾

그림 3(a)와 3(b)에 보인 항공영상은 특징기반 정

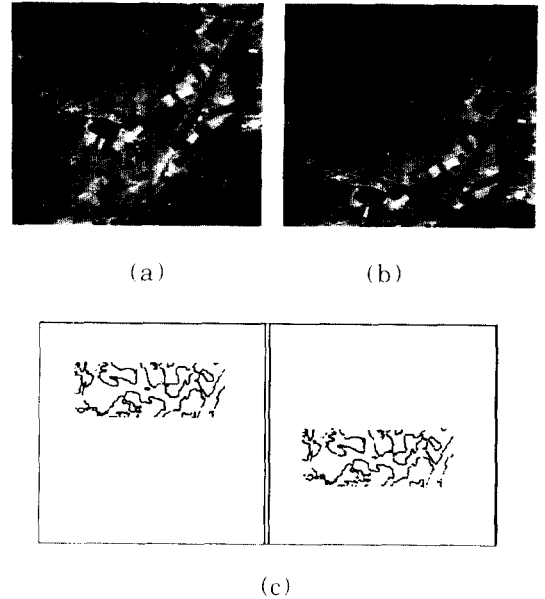


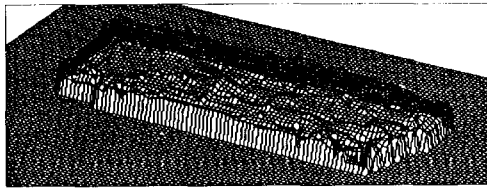
그림 3. 항공 영상쌍과 각 영상의 정합된 점들
(a) 이전 영상 (b) 현재 영상
(c) 각 영상의 정합된 점들

Fig. 3. Aerial images and the matched points in each image.
(a) previous frame, (b) current frame,
(c) matched points in each image.

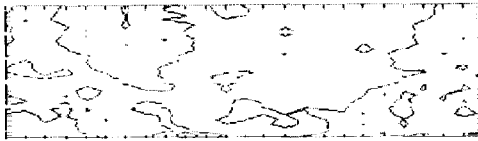
합 방법으로 실험한 영상쌍으로 1558m의 비행고도와 410m의 비행거리를 가지고 있으며 두 영상 취득 간격은 11초이다. 두 장의 영상에 대해 특징을 추출하기 위하여 LoG 필터를 사용하여 에지 영상을 찾아내었다. 실제 항공영상의 경우 대개 산악지형이나 농경지를 포함하고 있기 때문에 뚜렷한 에지 성분이 많이 존재하지는 않으므로 LoG 필터의 크기가 작으면 잡음의 영향을 많이 받는 복잡한 에지 영상이 되고 필터의 크기가 커지면 평활화되는 양이 많기 때문에 잡음의 영향은 덜 받지만 에지의 수가 줄어드는 단점을 가지고 있다. 그러므로 Grimson이 구현한 방법을 항공영상에 그대로 적용하기에는 적합치 않았다. 필터의 크기를 변화시켜 가며 실험하여 본 결과로는 표준편차 σ 가 4 이상, 창들의 크기가 16×16 이상이 되어야 정합할만한 에지 영상이 구해지는 것을 알 수 있었다. 또한 두 영상 전체를 정합하지 않고 겹쳐지는 영역에 한해 정합을 하는 것도 유효한 에지영상을 구성하기 어려운 이유중 하나이다.

영교차점은 +에서 -, -에서 +로 변화하는 영교차점이

있으며 영교차가 일어나는 방향도 수직, 수평방향으로 존재한다. 이러한 영교차점들의 특성을 이용하면 쉽게 정합할 수 있다. 탐색영역은 자연영상이 가지는 특징을 이용하여 존재할 수 있는 disparity 차를 추정하여 결정하였으며 대부분의 변수들은 영역기반 방법의 값을 그대로 이용하였다. 그림 3(c)에 두 영상에서 정합된 영교차점들을 보였는데 에지영상을 구성하기 위해 사용한 가는 8이고 창들의 크기는 33×33 이다. 이전 영상의 윗 부분과 다음 영상의 아랫부분의 겹쳐지는 영역에서 정합이 된 것을 볼 수 있다.



(a)



(b)



(c)

그림 4. 특징기반 정합 방법으로 복원된 지형의 등고선과 지도

- (a) 복원된 지형
- (b) 등고선
- (c) 지도

Fig. 4. Contour lines and map of the recovered terrain by the feature-based matching scheme.

- (a) recovered terrain.
- (b) contour lines.
- (c) map.

그림 4(a)는 그림 3(c)의 정합점들을 가지고 복원

해낸 지형이고 그림 4(b), (c)는 각각 복원된 지형의 등고선과 지도이다. 실험결과를 지도와 비교해보면 잘못 정합되는 점도 많이 생기며 전반적으로 오차를 많이 포함하고 있음을 알 수 있다. 잘못된 정합점이 생기는 가장 큰 이유는 에지 영상을 구성하는 과정에서 두 영상의 에지들이 차이를 가지고 구해지기 때문이다. 또한 영역기반 정합 방법은 주위 화소들을 이용하므로 스테레오 모델링에서 생길 수 있는 오차를 줄일 수 있지만 에지점들의 정합에 있어서는 모델링에서 발생한 오차가 커다란 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다. 다만 특징기반 방법은 에지영상을 구성하는 시간을 제외한 순수한 정합에 있어 계산량이 적은 장점을 가지고 있음을 알 수 있었다.

3. 항공영상에 적합한 스테레오 정합 방법

특징기반 정합 방법에 비해 영역기반 방법은 각 화소의 밝기를 그대로 이용하므로 영상 취득시의 회전이나 크기, 밝기 변화 등에 약한 단점을 가지고 있다. 그러나 자연 영상은 급격히 변하는 곳이 거의 없고 각 화소가 나타내는 높이들이 주위 화소가 나타내는 높이들과 거의 유사하며, 이러한 주위 화소들은 실제 지형 공간상에서도 인접한 지역을 나타내므로 영역기반 방법이 지형 영상의 복원 등에 많이 사용되고 있다. 그러므로 본 논문에서는 영역기반 방법을 정합 기법으로 선택하였으며 이러한 영역기반 정합 방법^{12,13}을 효과적으로 수행하기 위해서는 여러가지 변수들이 실험영상에 알맞도록 결정되어야 한다. 그러한 변수로는 탐색 영역의 결정방법, 유사함수의 선택, 정합의 판단기준 및 정합 창들의 크기 결정문제가 있다.

영역기반 정합 방법은 각 화소에 대해 주위화소 값들을 이용하여 정합하는데, 두 영상에서 대응되는 화소들에 대한 정보가 전혀 없다면 모든 화소에 대해 정합을 해봐야 되기 때문에 많은 계산량이 필요하다. 본 논문에서는 비행 방향으로의 최대분산값을 가진 점을 정합하여 구한 비행 방향으로의 상대적 편이값을 기준으로 하여 그 근방에서 정합점을 탐색하였으며 탐색되는 근방은 영상에 존재할 수 있는 disparity 차를 예측하여 결정하였다. 본 논문에서 사용한 영상이 지형을 포함한 영상이므로 disparity에 의한 높이가 비행고도보다 클 수 없으며 또한 1000m 이상의 높은 산은 포함하고 있지 않다는 점을 이용하여 탐색영역을 결정하였다. 비행 방향이 아닌 방향의 탐색영역은 두 영상간에 공선조건이 만족된다면 1차원으로 한정할 수 있다. 실제 항공영상의 경우는 두 영상을 어느 정도 일직선 상에 놓더라도 영상취득시의

비행체의 움직임이 한 방향으로만 존재하는 것이 아니기 때문에 정확히 하나의 직선상에 정합쌍이 놓이지 않는다. 실제 사용한 항공 영상들의 경우 직선 비행 방향이 아닌 방향으로 한두 화소 정도의 disparity 차를 가지고 있다. 이것은 두 영상의 겹쳐지는 영역에 전체적으로 분포하게 되므로 실제로는 한 직선이 다른 영상에서 부화소(sub-pixel) 단위 정도로 차이가 있는 직선에 일치하게 된다. 본 논문에서는 이러한 문제점 때문에 탐색 영역을 1차원 직선 성분에 제한하지 않고 대응하는 직선에 대해 좌우로 한 화소 떨어진 영역을 탐색영역에 포함시켜 2차원 탐색에 의해 정합하였다.

영역기반 방법은 이전 영상에서 한 화소에 대해 주위화소를 포함한 기준창틀(reference window)을 설정한 후 탐색 영역안에서 가장 유사한 창틀을 찾아내어 정합점을 알아내는 것이다. 이때 기준창틀과 탐색창틀(search window)의 유사도를 판단할 수 있는 척도로서 여러가지 유사함수의 성능 평가 결과 NCC(Normalized Cross Correlation)와 NCV(Normalized Cross coVariance)가 가장 성능이 좋은 것으로 알려져 있다. 본 논문에서는 식(5)의 NCV 유사함수를 정합의 척도로 사용하였다.

$$NCV = \frac{E[(W_r - E[W_r]) * (W(x,y) - E[W(x,y)])]}{(E[(W_r - E[W_r])^2] * E[(W(x,y) - E[W(x,y)])^2])^{1/2}}$$

단, $E[\] = \sum_{i=1}^{win_sz} \sum_{j=1}^{win_sz} \frac{1}{win_sz * win_sz}$ (5)

여기서 W_r 과 W 는 기준창틀과 탐색창틀을, win_sz는 정합창틀의 한 쪽 방향의 길이를 나타내며 (x, y) 은 기준창틀에 대응하는 탐색창틀의 중심좌표가 된다. 영역기반 정합 방법에서는 한 화소의 대응점을 결정하기 위하여 그 화소와 주위화소를 이용하는데, 이때 얼마나 많은 주위화소와 주위화소의 범위를 어떻게 결정하느냐에 따라 정합 성능에 큰 영향을 미친다. 이것은 정합시 사용하는 창틀의 모양과 크기를 결정하는 문제와 같다. 창틀 크기 결정방법은 이론적으로 정립되어 있지 않은데, 너무 작은 창틀을 사용할 경우 탐색영역에서 유사함수 값들이 비슷한 분포를 보여 정합점을 판단하기 어렵고, 큰 창틀을 사용할 경우에는 넓은 영역을 포함하게 되어 영상의 왜곡을 포함하기 쉽고 계산량도 많게 된다. 항공영상의 registration에는 11×11, 13×13 정도의 창틀이 적합함을 보였는데 본 논문에서 사용한 항공영상의 경우에도 위의 창틀 크기 정도면 정합에 어려움이 없음을 실험적으로 확인할 수 있었다. 창틀의 모양은

특징이 잘 포함되도록 결정하는 것이 이상적이나 각 영상에서 이러한 창틀을 찾는 일은 불가능하므로 정사각형의 창틀을 사용하였다.

위에서 언급한대로 여러가지 정합 요소들을 결정하고 이전 영상에 기준 창틀을 설정한 후 epipolar line과 평행한 직선과 주위의 두 직선에서 탐색 창틀을 설정하여 정합하였다. 기준창틀과 탐색 영역에서 유사함수값이 가장 큰 탐색 창틀의 중심 좌표를 정합점으로 판단하였고 유사함수 값의 크기를 이용하여 정합의 정확도를 판단하였다. NCV 유사함수값은 -1부터 1사이의 값을 갖는데 1에 가까울수록 두 창틀간의 유사도는 크다. 정합점은 가장 큰 유사함수 값을 갖는 곳의 좌표로 정해지며 정합점들의 유사함수 값의 크기는 모두 다르다. 이때 유사함수 값이 클수록 정합의 신뢰도는 크므로 실험에서는 정합점의 유사함수 값이 임계치를 넘는 경우에는 정확히 정합되었고 판단하였고 임계치를 넘지 못하는 정합점은 정합이 안된 것으로 판단하여 후처리 과정에서 보간 방법으로 고도를 추출하였다. 정합점의 유사함수 값은 정합의 정확도 판단 기준으로도 사용하였지만 탐색 영역을 줄이는 데도 이용하였다. 이것은 정확히 정합된 화소에 이어지는 다음 화소의 탐색 영역을 줄여주는 방법으로 가능하였다. 왜냐하면 지형영상의 특징상 정합이 쉬운 점들이 모여서 나타나기 때문이다.

Disparity map에서 자연 영상이 가지는 특징을 이용하여 잘못 정합된 점을 제거하였다. 자연 영상의 경우는 절벽과 같이 disparity가 급격히 변하는 점은 거의 존재하지 않고 어느 정도 연속적인 disparity의 변화를 갖는다고 가정하였다. 이점을 이용하여 disparity가 급격히 변하는 점들은 제거하였다. 이러한 과정을 마치면 겹쳐지는 영역에 대해 믿을 수 있는 점만의 disparity가 구해진다. 유사함수 값이 작아서 잘못 정합되었다고 판단된 점과 급격한 disparity 변화를 보여 제거된 점들은 보간을 통하여 disparity를 구하였다. 보간 방법¹⁰⁾은 네방향 보간방법으로 수평, 수직 방향의 네 주위화소에 대해 거리를 고려하여 선형보간을 하였다.

IV. 공면조건을 만족하지 않는 스테레오 영상의 깊이정보 추출

정합점이 결정되어 각 화소들의 disparity가 결정되면 실제 지형의 고도를 추출해 낸다. 카메라의 화각(angle of view)과 초점 거리(focal length)는 카메라의 규격에서 알 수 있는데 이 값들에 의해 영상에 나타나는 실제 지형의 넓이가 결정된다. 본 논문

문에서 영상 취득시 사용한 카메라는 8.5mm의 초점 거리와 비행방향으로 42.4도, 좌우로 54.7도의 화각을 가지고 있다. 화각과 초점거리, 비행 고도 그리고 영상의 표본화 간격을 알면 비례식에 의하여 영상의 한 화소에 해당하는 지상에서의 거리를 계산할 수 있다.

$$\text{한화소의 실제거리} = \tan(\text{화각}) \text{비행고도} / \text{양자화 간격} \quad (6)$$

항공 영상의 각 화소가 나타내는 실제거리는 지형의 형태에 따라 다르지만 실제 실험에 있어 계산이 불가능하므로 식 (6)을 이용하여 정합되는 화소들의 크기는 모두 같다고 가정하였다. 비행기의 속도계는 지상의 속도를 나타내는 것이 아니므로 베이스 라인의 길이를 속도계에서 알아낼 수는 없다. 본 논문에서는 최대분산점을 정합하여 구한 비행방향의 상대적 편이에 비행방향으로의 한 화소의 실제거리를 곱하여 그 거리를 베이스 라인의 길이로 결정하였다.

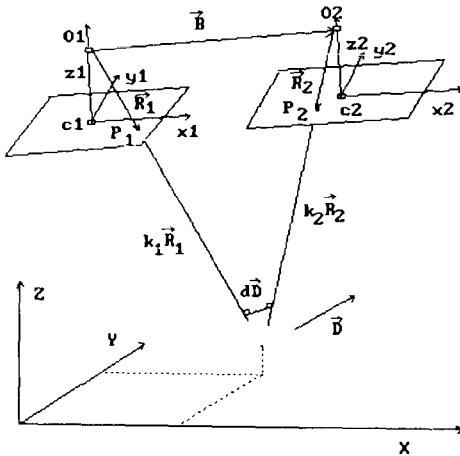


그림 5. 깊이정보 추출을 위한 스테레오 모델링
Fig. 5. Stereo modeling for depth extraction.

항공영상의 스테레오 모델링은 다른 모델링과는 달리 깊이 정보를 삼각공식에 의해 쉽게 구할 수 없다. 그림 5에 본 논문에서 사용한 깊이정보 추출의 모델링을 나타내었다. 여기서 P1과 P2는 두 스테레오 영상에서 정합점을, O1과 O2는 스테레오 영상취득시의 카메라의 초점을 나타내며 O1과 O2를 잇는 직선이 베이스 라인을 나타낸다. 그리고 정합점 P1, P2와 초

점 O1, O2가 하나의 평면상에 존재해야 하는데 이것을 공면조건이라 한다. 공면조건을 만족할 경우 P1과 O1을 잇는 직선과 P2와 O2를 이루는 직선이 한점에서 만나게 되어 깊이가 유일하게 결정되며 이것이 두 정합점이 공통적으로 나타내는 지형의 깊이가 된다. 그러나 본 논문에서 실제 항공영상을 가지고 실험하여 본 결과, 공면조건을 만족시키는 정합점은 거의 없다. 왜냐하면 지형을 표본화하여 영상의 화소로 표현한 것이므로 부화소 단위로 정합을 하지 않는한 공면조건을 정확히 만족시키지 못하기 때문이다. 또한 항공영상의 스테레오 모델링에 있어 이용된 계기값인 roll, pitch, heading값들이 계기를 촬영한 영상으로부터 눈으로 읽어들이는 것이어서 오차가 포함된 것도 공면조건을 만족시키지 못하는 이유이다.

본 논문에서 공면조건을 만족시키지 못하는 정합점들에 대해 벡터 방정식을 풀어 깊이를 결정하였다. 초점 O1에서 O2를 잇는 벡터를 B, O1에서 P1을 잇는 벡터를 R1, O2에서 P2를 잇는 벡터를 R2라 하자. 공면조건식을 만족시키지 않는 경우 두 벡터 R1과 R2에 적당한 스칼라를 곱하더라도 만나지 않고 공간상에서 빗겨나가게 된다. 그러므로 본 논문에서는 두 직선의 최단거리를 잇는 벡터를 구하여 그 벡터의 중점의 깊이를 정합점의 깊이로 결정하였다.

$$D = R_1 \times R_2 \quad (7)$$

식 (7)의 벡터 D를 R1과 R2에 모두 수직인 벡터라 하면 벡터 B, R1, R2에 대해 다음과 같은 벡터 방정식을 세울 수 있다.

$$k_1 \cdot R_1 - k_2 \cdot R_2 + d \cdot D = B \quad (8)$$

여기서 k1, k2, d는 각 벡터에 곱해지는 상수를 나타낸다. 그러므로 이 상수값들을 결정하면 두 정합점의 깊이를 결정할 수 있다. 식 (8)의 벡터 방정식은 Conxeter의 벡터 분석방법¹²⁾에 의해 해를 구할 수 있다.

$$k_1 = \frac{B \cdot D \times R_2}{R_1 \cdot D \times R_2}, \quad k_2 = \frac{R_1 \cdot D \times B}{R_1 \cdot D \times R_2}, \quad d = \frac{R_1 \cdot B \times D}{R_1 \cdot D \times R_2} \quad (9)$$

식 (9)와 같이 각 벡터에 곱해지는 상수를 결정하여 정합점들의 깊이정보를 추출하였다. 이러한 깊이정보는 비행체로부터 지형까지의 깊이정보이므로 실제 지형이 가지고 있는 해발고도는 비행체의 해발고도로부터 깊이정보 값을 빼서 구할 수 있다. 이때 비행체의 정확한 높이를 알 수 없으므로 비행 계기에 나타나는

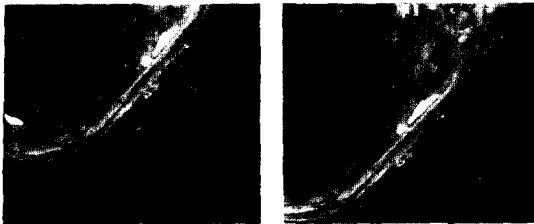
고도에 영상에 나타나는 지형들의 평균 고도 값을 더한 값을 해발고도로 사용하였다.

V. 실험결과 및 토의

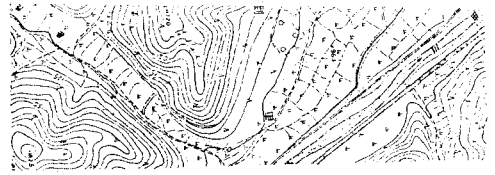
본 절에서는 실제 항공영상에 대한 실험결과를 보이고 성능평가를 하였다. 대부분의 성능평가¹¹⁶⁾는 지도와 복원된 REM의 등고선과의 비교에 의한 것이며 절대고도 값의 비교가 가능한 곳에서는 지도의 고도 값도 비교하여 보았다. 복원된 부분은 가상의 1점에서 설명한 방법대로 정합영역을 결정한 결과이며 이 영역은 각 실험영상쌍마다 약간씩 차이를 보이고 있다. 비교대상인 지도는 복원한 지형에 해당하는 부분을 모두 포함하도록 나타내었다. 그리고 복원된 REM을 DEM과 정합하여 현재 위치를 확인하여 보았다.

1. REM 복원

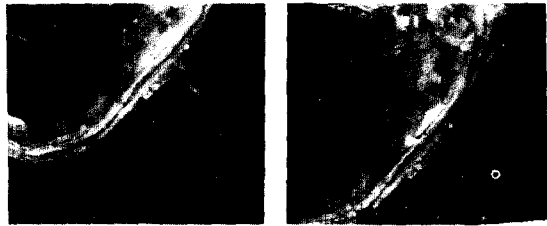
그림 6(a)에 보인 영상은 비행 고도 1447m에서 취득된 영상이며 두 영상의 취득간격은 9초로 비행거리 340m였다. 다음 영상은 이전 영상에 대해 heading이 4도만큼 회전되어 취득되었다. 먼저 두



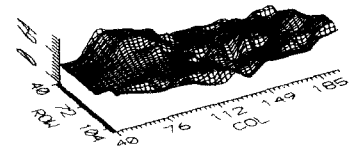
(a)



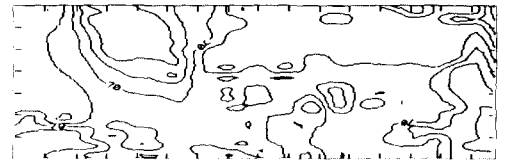
(c)



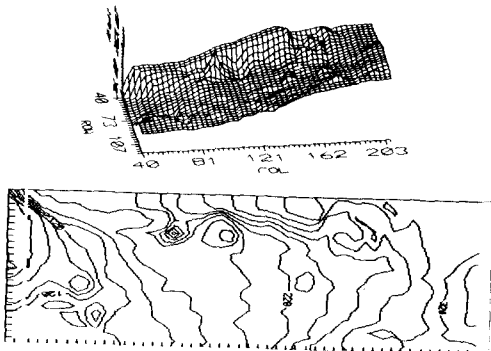
(d)



(e)



(f)



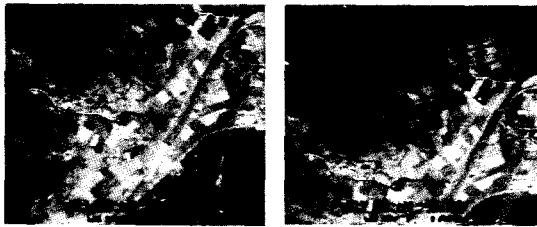
(b)

그림 6 복원된 지형과 지도 (실험 영상쌍 1)

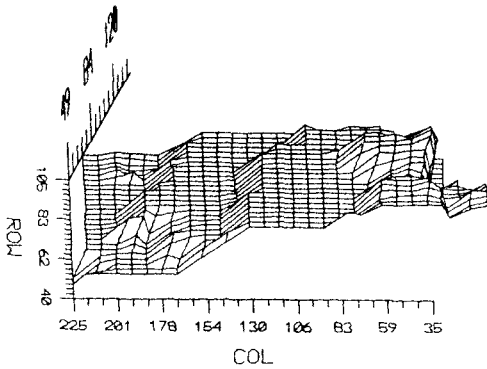
- (a) 실험 영상쌍 1
- (b) (a)로부터 복원된 지형과 등고선
- (c) 지도
- (d) 보정된 실험 영상쌍 가
- (e) (d)로부터 복원된 지형과 등고선

Fig. 6. Recovered terrain and map (test image pair 1).

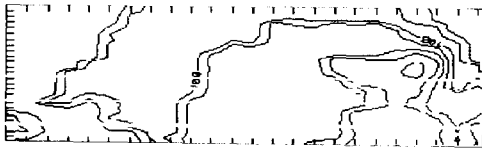
- (a) test image pair 1.
- (b) terrain and its contour lines recovered from (a).
- (c) map.
- (d) transformed image pair 가.
- (e) terrain and its contour lines recovered from (d).



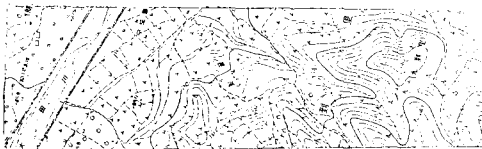
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 7. 복원된 지형과 지도 (실험 영상쌍 II)

- (a) 실험 영상쌍 II
- (b) 복원된 지형
- (c) 등고선
- (d) 지도

Fig. 7. Recovered terrain and map (test image pair II).

- (a) test image pair II.
- (b) recovered terrain.
- (c) contour lines.
- (d) map.

영상을 보정하지 않고 취득된 상태 그대로 정합하여 보정의 필요성을 확인하였다. 실험에 사용한 쌍들의 크기는 13×13 이며 유사함수값의 임계치는 0.8이다. 그림 6(b)에 복원해낸 지형의 3차원 모양과 등고선을 나타내었는데 왼쪽은 낮고 오른쪽은 높은 지형으로 복원되는 것을 볼 수 있다. 이것은 복원된 지역의 그림 6(c)의 실제지형과는 상당한 차이를 보여주고 있다. 실제로는 왼쪽에 높은 산봉우리가 있고 오른쪽 지역은 강과 들로 구성되어 있기 때문이다. 이러한 오차를 보인 가장 큰 이유는 역시 두 영상 취득시에 비행체의 heading 각도가 틀렸기 때문에 공선조건을 만족시키지 못하는 상태에서 정합을 했기 때문이다.

다음에는 항공 영상쌍 가을 두 영상취득시 가지는 heading의 차이만큼 보정하여 실험하였다. 그림 6(d)에 항공 영상쌍 가을 보정한 영상을, (e)에 복원된 지형의 3차원 형태와 등고선을 나타내었다. 실험 결과를 그림 6(c)의 지도와 살펴보면 거의 유사한 지형이 복원됨을 알 수 있다. 지도의 왼쪽 위쪽에 나타나는 조그만 산이 잘 복원되었고 산 오른쪽으로 존재하는 강을 낀 들 지역도 비교적 평탄하게 복원된 것을 볼 수 있다. 다만 평평한 들 지역에서 잘못 정합된 점에 의하여 깨진 형태의 지형이 나타나는 것을 알 수 있다.

그림 7(a)의 항공 영상쌍 가을 고도 1558m에서 비교적 안정한 비행자세에서 취득되었으며 두 영상의 취득시 비행거리는 410m였다. 그림 7(b)의 결과를 살펴보면 왼쪽 위에서 오른쪽 아래로 높아지는 지형을 나타내고 있음을 알 수 있다. 왼쪽 위의 평평한 지역은 강을 포함한 들 지역이 복원된 것이며 오른쪽 아래쪽에 산봉우리가 복원되어 나타난 것을 확인할 수 있었다. 실험 영상쌍 가의 경우는 산 봉우리가 포함되어 있으므로 지도에서 나타나는 산봉우리의 위치를 비교할 수 있었다. 복원해낸 지형을 나타내는 등고선의 축적을 지도와 동일하게 하여 비교한 결과 약 1cm 이내의 오차를 보였다. 성능평가에 사용한 지도들이 5000:1의 지도이므로 약 50m 이내의 위치 오차를 가지고 있음을 확인할 수 있었다. 그림 7(c)에 실험 영상쌍 가에서 복원해낸 지형의 등고선을 보였으며 (d)에 해당되는 지역의 지도를 나타내었다.

그림 8(a)는 비교적 안정한 비행상태에서 취득된 영상으로 영상 취득시의 비행고도는 1558m였으며 비행속도는 80 knot로 두 영상취득시 비행거리는 412m였다. 그림 8(b)에 항공 영상쌍 가를 사용하여 복원한 지형의 3차원 형태와 등고선 모양을 나타내었다. 왼쪽 위의 지역에서 오른쪽 아래지역으로 낮아지는 경사를 갖는 지형을 REM이 정확히 복원하였음을

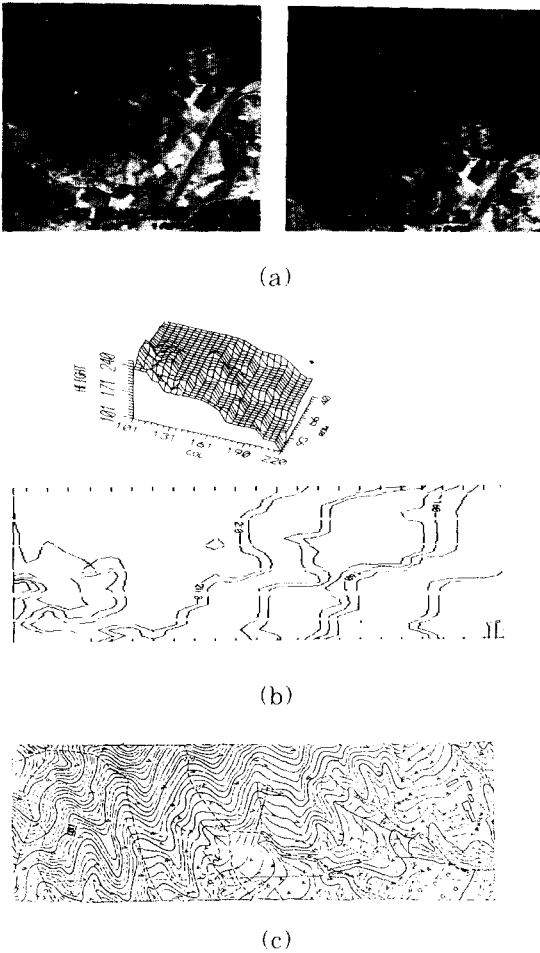


그림 8. 복원된 지형과 지도 (실험 영상쌍 Ⅲ)
 (a) 실험 영상쌍 Ⅲ
 (b) 지형과 등고선
 (c) 지도

Fig. 8. Recovered terrain and its map (test image pair Ⅲ).
 (a) test image pair Ⅲ.
 (b) recovered terrain and its contour lines.
 (c) map.

알 수 있다. 그리고 절대 고도 값에 있어서도 REM의 가장 높은 지형이 210m로 지도의 200m와 10m 정도의 차이를 보였으며 오른쪽 아래의 가장 낮은 지역도 100m로 복원되어 지도에서 90에서 100m의 고도를 보이는 지역과 차이없이 거의 정확히 복원된 것을 확인할 수 있다.

2. REM과 DEM의 정합 [16, 17]

REM이 구성되면 DEM과 정합을 통하여 비행체의 현재 위치를 알아낼 수 있다. 왜냐하면 REM이 정합되는 DEM의 위치를 통해 해당되는 지역의 위도와 경도를 알 수 있기 때문이다. 그림 9(a)에 실험에 사용하기 위하여 잘라낸 DEM을 보였다. 이 DEM은 256×256의 크기로 한 화소당 위도 방향으로 16.3m, 경도 방향으로 13.3m의 지역을 나타내므로 위도 방향으로 4173m, 경도 방향으로 3405m의 지형을 포함하고 있다. Rodriguez와 Aggarwal [4]은 REM과 DEM의 지형정보를 contour 영상으로 나타낸 후 contour에 존재하는 극점들 (critical points)의 정합을 통해 두 지형정보를 정합하였다. 이러한 방법은 실제 항공영상에 적용한 결과 만족한 결과를 얻을 수 없었다. [17] 왜냐하면 REM이 DEM에 비해 상당히 작은 지형정보이므로 REM의 contour를 가지고 DEM의 contour와 정합하기가 불가능하기 때문이었다.

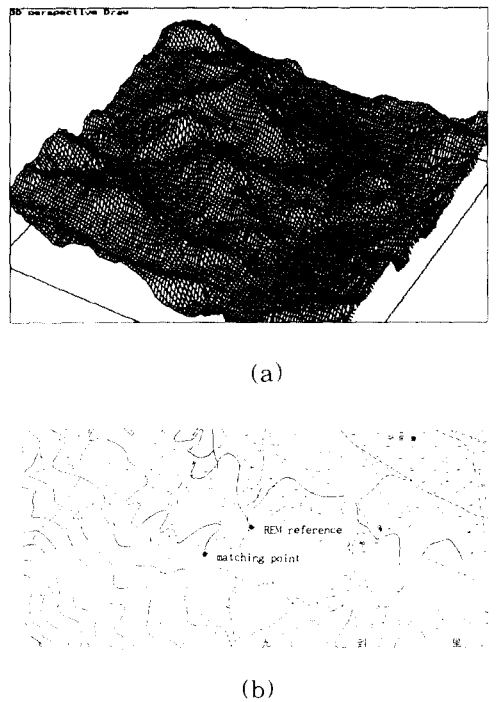


그림 9. 실험에 사용한 DEM과 해당하는 지역의 지도
 (a) DEM, (b) 지도

Fig. 9. DEM and map of the areas used in experiment.
 (a) DEM, (b) map.

DEM과 정합할 REM은 항공 영상쌍 가에서 복원된 지형이다. DEM의 경우는 자북을 기준으로 복원되어 있으므로 REM을 회전시켜 줌으로써 정합을 좀더 용이하게 수행할 수 있다. 실험에 사용한 REM은 자북을 중심으로 반 시계방향으로 98°만큼 회전되어 있는데, 즉 영상취득시 비행체의 진행방향이 자북에 대해서 그만큼 회전되었다는 것이다. 두 지형정보의 한 화소당 실제 거리가 틀리므로 REM을 축소시켜 DEM의 한화소와 비슷한 크기로 스케일을 맞추었다. 이러한 전처리 과정을 거친 후에 본 논문에서는 REM을 기준창틀로 생각해서 DEM과 영역기반 방법으로 정합하였으며 정합 결과 약 120m 정도의 오차를 보였다. 이것은 복원된 REM을 지도에 표기하고 그리고 DEM과 정합된 점의 위도, 경도를 확인하여 두 지점의 차이를 계산해낸 것이다. 전절에서 실험 영상쌍 가의 산봉우리의 오차가 50m 이내였던 것을 고려해볼 때 큰 오차가 난 것을 알 수 있다. 이러한 원인으로는 REM과 DEM을 정합하는 알고리즘이 최적이지 아니라는 것과 데이터 베이스로 사용하고 있는 DEM도 SPOT 위성영상에서 복원해낸 것이어서 위치 오차를 이미 포함하고 있기 때문이다. 그림 9(b)에 기준 창틀로 사용한 REM의 위치와 정합된 점이 나타내는 위치를 지도에 표기하였다.

REM과 DEM의 정합을 통하여 비행체의 현재 위치를 알아냄으로써 영상항법 시스템의 절대위치 보정에 응용할 수 있다. 이러한 절대위치 보정은 일정한 시간간격 즉 REM 복원과 DEM과의 정합에 소요되는 시간(본 논문의 경우 약 3분) 보다 커야 하며 또한 적당한 거리로 예를 들면 10km 항법에 한번 정도 수행하면 비행 위치 보정의 효과를 기대할 수 있으리라 생각된다.

VI. 결론

본 논문에서는 연속 항공영상을 스테레오 모델링하여 지형을 복원하였다. 항공 영상은 비행체에 부착된 카메라에서 취득한 실제 영상을 사용하였으며 지형의 복원은 DEM과의 정합을 통한 비행 위치의 확인을 위한 것이다. 실험결과 복원된 지형은 등고선으로 구성하여 지도와 비교하여 성능평가를 하였다. 성능평가 결과, 복원된 지형은 절대고도 값은 약간의 차이를 가지고 있지만 전체적인 윤곽은 지도가 나타내는 지형과 거의 유사하게 복원됨을 알 수 있었다. 정합 오차가 생기는 가장 큰 이유는 스테레오 모델링에서 발생한 것으로 보인다. 이것은 실험에 사용한 비행계가 영상에서 눈으로 읽어들이기 어려워서 오차를 포

함하고 있기 때문에 그 계기값을 따른 스테레오 모델링 단계와 깊이추출 단계에서 모두 영향을 미쳤기 때문이다.

복원된 REM을 SPOT 위성영상으로부터 복원된 DEM과 정합을 통하여 비행위치를 추정된 결과 약 120m 정도의 오차를 보였는데 이것은 REM 자체가 가지고 있는 오차와 DEM이 가지고 있는 오차를 모두 포함한 것으로 보인다. DEM을 지도로부터 생성하는 등의 방법으로 좀 더 정확한 기준을 갖고 있다면 이 오차는 약간 줄어들 것으로 예상된다. 물론 DEM과 REM을 정합하는데 좀 더 알맞은 알고리즘의 개발도 필요할 것이다. 계기값의 디지털 입력에 의한 정확한 스테레오 모델링과 정합 알고리즘의 개선 및 또한 기준으로 삼고 있는 DEM의 정확한 구축 등도 앞으로의 연구과제이다.

參考文獻

- [1] Y. Bresler and S. J. Merhav, "On-line vehicle motion estimation from visual terrain information Part II: Ground velocity and position estimation," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. AES-22, pp. 588-604, Sep. 1986.
- [2] Y. Bresler and S. J. Merhav, "Recursive image registration with application to motion estimation," *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Process.*, vol. ASSP-35, pp. 70-85, Jan. 1987.
- [3] 강 민석, 김 준식, 박 래홍, "연속 영상에서의 Image Registration," 1991년도 제 4회 신호처리 합동학술대회 논문집, 제 4권 제 1호, pp. 149-152, 1991년 9월.
- [4] J. J. Rodríguez and J. K. Aggarwal, "Matching aerial images to 3-D terrain maps," *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, vol. PAMI-12, pp. 1138-1149, Dec. 1990.
- [5] T. Kanade, *Three-Dimensional Machine Vision*, Kluwer Academic Publishers, 1987.
- [6] M. A. Fischler and R. C. Bolles, "Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography," *Commun. ACM*, vol. 24, pp. 381-395,

- June 1981.
- [7] S. K. Ghosh, *Analytical Photogrammetry*. Pergamon Press, 1979.
- [8] 강 민석, 박 래홍, 이 쾌희, "연속 항공영상의 스테레오 모델링에 의한 지형정보 복원." 1992년도 제 5회 신호처리 합동학술대회 논문집, 제 5권 제 1호, pp. 267-270, 1992년 9월.
- [9] 강 민석, 김 준식, 박 래홍, 이 쾌희, "연속 항공영상에서의 Image Registration." 전자공학회 논문지, 제 29권 B편 제 4호, pp. 48-57, 1992년 4월.
- [10] W. E. L. Grimson, "Computational experiments with a feature based stereo algorithm." *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, vol. PAMI-7, pp. 17-34, Jan. 1985.
- [11] W. Hoff and N. Ahuja, "Surfaces from stereo: Integrating feature matching, disparity estimation, and contour detection." *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, vol. PAMI-11, pp. 121-136, Feb. 1989.
- [12] D. I. Barnea and H. F. Silverman, "A class of algorithms for fast digital image registration." *IEEE Trans. Comput.*, vol. C-21, pp. 179-186, Feb. 1972.
- [13] D. R. Sullivan and J. S. Martin, "A coarse search correlation tracker for image registration." *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. AES-17, pp. 29-34, Jan. 1981.
- [14] R. Mohan, G. Medioni, and R. Nevatia, "Stereo error detection, correction, and evaluation." *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, vol. PAMI-11, pp. 113-120, Feb. 1989.
- [15] A. Blake and A. Zisserman, *Visual Reconstruction*. MIT Press: Cambridge, MA & McGraw-Hill Book Co.: New York, NY, 1987.
- [16] Y. C. Hsieh, D. M. McKeown, Jr., and F. P. Perlant, "Performance evaluation of scene registration and stereo matching for cartographic feature extraction." *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, vol. PAMI-14, pp. 214-238, Feb. 1992.
- [17] 김 준식, 강 민석, 박 래홍, 이 쾌희, "3차원 지형정보를 이용한 지형영상의 정합기법." 대한원격탐사학회지, 제 7권 제 1호, pp. 13-27, 1991년 3월.

 著 者 紹 介

姜旻碩(準會員) 第 29 卷 B 編 第 4 號 參照
 1993년 서강대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사) 현재 삼성전자 통신개발실 근무중

朴來弘(正會員) 第 29 卷 B 編 第 4 號 參照
 현재 서강대학교 전자공학과 부교수

金俊植(正會員) 第 29 卷 B 編 第 4 號 參照
 1993년 서강대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학박사) 현재 서강대학교 부설 산업기술연구소 연구원

李夫熙(正會員) 第 29 卷 B 編 第 4 號 參照
 현재 서강대학교 전자공학과 부교수