

3차원 지형정보를 이용한 지형영상의 정합기법

김준식·강민석·박래홍·이쾌희
서강대학교 전자공학과
(1991년 2월 1일 받음; 1991년 2월 10일 수리)

Terrain Matching Technique Using 3-D Terrain Maps

Joon-Seek Kim, Min Seok Kang, Rae-Hong Park and Kwae-Hi Lee
Dept. of Electronic Engineering, Sogang University
(Received Feb. 1, 1991; Accepted Feb. 10, 1991)

Abstract

DEM(digital elevation map) is a very useful information in various applications. In this paper, we have studied on the terrain matching algorithm using the DEM, which was proposed by Rodriguez and Aggarwal(1990) for an aircraft navigation system. We evaluated its performance using syntactic images.

Cliff maps and critical points are used for the reduction of computation time and information size to be processed. The computer simulation shows that though the computational complexity is high, the technique is efficient even to noisy images.

1. 서론

DEM(Digital Elevation Map)은 지형에 대한 3차원적인 정보로, 초기의 응용분야는 지표면에 대한 분석이나 측정을 위해서만 사용되었다. 그러나 최근에는 응용분야가 넓어지면서 비

행 조종사의 모의 비행술 실험이나 항법장치 등 여러 곳에서 사용될 수 있게 되었다.

항법 시스템은 비행체의 진로, 방위 등을 탐지하여 목적지까지 정확하게 비행하는 데 필요한 시스템으로서, 초기 단계의 육안식별에서 시작된 항법 시스템의 발전은 과학기술의 발전과 함께 magnetic compass, radio compass, radio altimeter, ADF(Automatic Direction Finder), VOR(Very High Omnidirectional Range), TACAN(Tactical Air Control And Navigation), LORAN(Long Range Air Navigation), DME(Distance Measuring Equipment), drift meter, astro-compass, astro-graph, doppler navigation system, INS(Inertial Navigation System) 등으로 발전하였다.

또한, 군사적 목적을 위해 TERCOM(Terrain Contour Matching), DSMAC(Digital Scene Matching Area Correlation) 등의 장거리 항법 시스템도 개발되었다. 최근에 개발된 항법 시스템은 외부의 station을 사용해 비행을 하는 시스템이 대부분이며, jamming에 약한 특성을 가지고 있으며, INS를 사용하는 경우에는 비교적 정확한 비행을 할 수 있지만 고가이며, 정비 및 운영에 어려움이 따르므로, 현재의 항법 시스템을 소형의 비행체에 적용을 하기 위해서는 더 많은 연구가 필요하며, 소형 비행체에 적합한 시스템의 개발이 요구된다.

시간에 따라 연속적인 지형영상과 DEM이 주어지면 관측자의 궤적을 결정하는 것이 가능하며, 관측자의 궤적을 결정하기 위해서는 연속적인 intensity 영상으로부터 3차원 정보를 추출한 후 참고지도(reference map)인 DEM과 정합함으로써 참고지도 내의 관측자의 위치와 방향이 결정된다. 이와 같은 시스템은 영상처리 기술을 도입한 항법 시스템으로, 외부의 도움 없이 비행체의 독자적인 비행이 가능하며, 소형 비행체에 적용 가능한 시스템으로 각광받게 될 것이다.

본 논문에서는 최근에 Rodriguez(1990) 등의 DEM을 사용한 항공기의 현재 위치 및 방향 인지 알고리즘에 대해 시스템의 전체적인 구성과 컴퓨터 모의실험을 통한 성능평가를 해 보았다.

2. 시스템 구성

Fig. 1은 연속적인 입력 intensity 영상들과 미리 주어진 DEM을 정합시킴으로써 관측자의 위치와 방향을 결정할 수 있는 시스템의 구성을 나타낸다. 그림에서 보듯이 시스템의 구성은 크게 세 부분으로 나눌 수 있다. Part I은 참고지도를 구성하기 위한 부분으로, 항공기의 비행과 관계 없이 off-line으로 실행될 수 있으며, 비행 전에 결정되는 부분이다. 이 때 DEM은

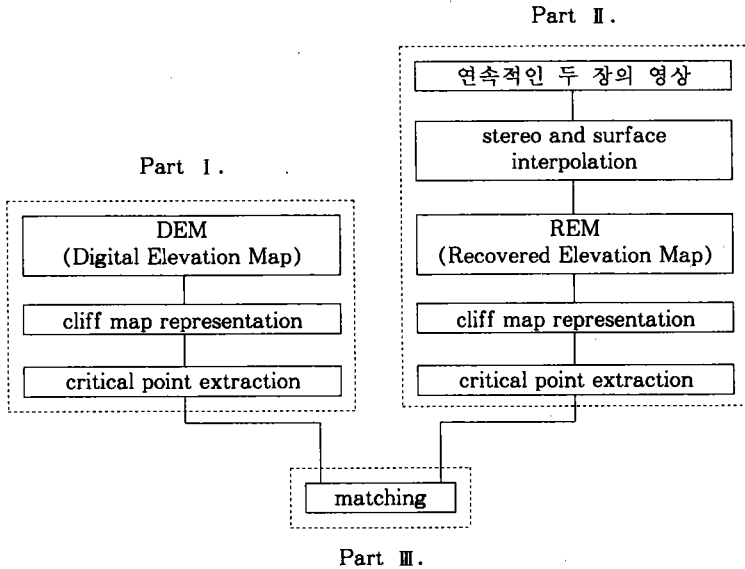


Fig. 1. System Blockdiagram.

위성이나 항공기에 의해 얻어진 영상을 사용해 구할 수 있으며, 얻어진 DEM으로부터 정합에 사용하기 위한 특징점 추출 과정이 필요하게 되며, 이러한 작업을 해 주는 부분이 Part I이다.

Part II는 실제 항공기가 비행을 하면서 취득한 intensity 영상으로부터 3차원 지형정보를 구하는 부분이다. Intensity 정보로부터 3차원 정보를 얻기 위해 스테레오 정합 기법을 사용하여 상대적인 고도정보를 추출하게 되며, Part I과 Part II에서 추출된 3차원 영상의 특징점들을 정합하는 부분이 Part III으로, 정합된 결과로부터 관측자의 위치와 방향을 결정하게 된다.

3. Part I에 대한 분석

이번 절에서는 Fig. 1의 Part I 부분에 대해 좀더 자세히 알아본다.

Part I의 기능은 앞서도 설명한 것처럼 항공기가 비행하면서 현재 관측자의 위치와 방향을 알기 위한 참고지도를 구성하기 위한 부분이다. 여기서 DEM은 항공기 비행로 부근에

대한 고도정보로서, 비행하고자 하는 지역의 고도정보를 수치로 나타낸 지도이며, 비행로의 길이에 따라 정보량이 증가하게 되며, 이러한 DEM의 저장을 위해서는 상당히 방대한 크기의 저장매체(메모리)가 항공기 내에 필요하게 될 뿐만 아니라, 정합과정에서도 많은 계산량을 필요로 하게 된다. 따라서 이러한 정보량의 증가를 막을 수 있으며, 참고고도지도(DEM)와 복원고도지도(REM:Recovered Elevation Map)를 정합함에 있어 효율적인 정합점의 탐색을 위해서는 새로운 정보 저장방법이 필요하며, 이것을 해결하기 위한 특징으로 제안된 것이 cliff map과 critical point이다.

3.1 Cliff map 추출

Cliff란 고도지도(depth map) 신호를 2차 미분한 Gaussian 함수(LoG: Laplacian of Gaussian function) 형태의 여파기를 통해 거른 후 영교차(zero crossing)가 발생하는 점으로 정의하며, 이의 물리적 의미는 고도지도에서 고도의 급격한 변화를 갖는 경계부분을 의미하게 된다. 이때 사용되는 LoG 여파기는 Marr(1980) 등이 제안한 필터로, 영상에서 빛의 밝기가 급격하게 변하는 경계 부분을 검출하기 위해서 사용되는 경계검출 연산자의 한 종류이며, 이 연산자의 특성은 잡음에 강한 특성을 보이고 외부에서 주어지는 파라미터, 즉 Gaussian 여파기의 표준편차에 따라 세밀한 정도가 다른 경계를 검출할 수 있는데, 표준편차의 값이 커짐에 따라 경계 폐곡선의 수는 줄어드나 폐곡선의 길이는 길어지고, 경계선들의 복잡성은 작아진다.

LoG 여파기를 통과하여 나온 신호들로부터의 영교차점 검출은 현재 신호의 주변 신호들의 특성을 분석하여 이 특성을 판단기준으로 영교차점을 검출하게 되는데, 현재 신호를 기준으로 2차원적인 공간상에서 상하좌우의 이웃신호가 서로 다른 부호를 갖게 된다면 이 신호가 바로 영교차점이 된다. 이와 같은 과정을 거쳐 얻어진 지도영상이 cliff map이 된다.

고도지도를 표현하기 위해 cliff map을 사용하는 이유는 여러 가지가 있다. 첫째, cliff map 자체는 고도지도보다 훨씬 간단하면서도 지표에 대한 정보를 비교적 잘 보존하고 있으므로 고도지도 저장에 많은 저장매체를 사용하지 않아도 되며, 둘째로, cliff map을 계산하는 과정의 LoG 여파기는 여러 잡음(스테레오 양자화 에러, surface interpolation 에러)을 제거하는 효과를 가져올 수 있으므로 잡음신호에 대한 성능향상을 가져오며, 마지막으로 가장 큰 장점은 정합 알고리즘에 있어서 모든 고도값을 사용하지 않고 정합이 가능하므로 계산량의 축소를 얻을 수 있다.

3.2 Critical point 추출

참고 고도지도(reference DEM)와 복원된 고도지도(REM)에서 각각 cliff map을 구함으로써 3차원 정합 문제가 2차원 정합 문제로 바뀌었다. 그 다음 단계로 REM의 cliff들이 DEM의 어느 위치에 해당하는가를 결정하기 위해 모든 cliff들을 정합하는 것보다는 cliff map 내의 폐곡선 중에서 큰 곡률을 갖는 극점(critical point)들을 찾아내어 정합하는 것이 훨씬 간단할 것이다.

극점은 cliff map의 각각의 곡선에서 곡률값이 임계치 이상인 점으로 정의한다. 극점을 구하는 데는 몇 가지 단계가 필요하다. 첫번째는 cliff map의 각각의 곡선들이 체인 코드로 나타내져야 한다. 체인 코드의 값과 방향은 Fig. 2와 같이 8방향 체인 코드로 정의한다(Mckee 1987).

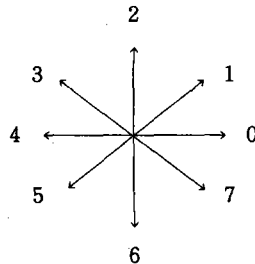


Fig. 2. 8-Neighbor Chain Code.

두번째 단계는 길이가 너무 긴 곡선을 잘라서 처리해 주고 짧은 곡선은 잡음에 의한 영향으로 볼 수 있으므로, 처리하지 않아도 별 영향이 없다. 세번째 단계는 체인 코드를 정규화하는 것으로 Shahraray(1985) 등에 의해서 제안된 것을 사용하였으며, 정규화과정은 다음과 같다. 체인 코드의 배열을 chain이라고 할 때,

```
if {abs(chain[i]-chain[i-1])>4 and (chain[i]-chain[i-1])>0} chain[i]=chain[i]+8;
else {abs(chain[i]-chain[i-1])>4 and (chain[i]-chain[i-1])<0} chain[i]=chain[i]-8;
```

네번째 단계는 곡률을 구하는 과정이다. 곡률을 구하기 위해서는 앞에서 구한 체인 코드와

1차 미분한 Gaussian 여파기(derivative of Gaussian; DoG)와 convolution해야 하며, DoG 여파기는 기울기를 구하기 위한 미분기와 잡음 제거를 위한 Gaussian 여파기의 합성으로 볼 수 있다. DoG 여파기는 다음과 같은 식으로 표현되는데,

$$G'(s) = \frac{-s}{\sigma^3 \sqrt{2\pi}} \exp(-s^2/2\sigma^2) \dots \dots \dots (1)$$

여기서 σ 값은 평활량을 결정한다. 마지막 단계는 곡률 - 호 길이로 구해진 값에서 극점에 해당하는 점들을 찾아내는 것이다. 곡률값에서 극점에 해당하는 점을 임계점으로 정할 수도 있다. 그렇게 되면 너무 많은 점들을 정합해야 하는 경우도 생기므로 알맞는 점의 개수를 만들어 주어야 한다. 적당한 문턱치를 정해서 극점들 중에 문턱치를 넘는 곡률값을 갖는 점들을 극점(critical point)으로 정하면 된다.

4. Part II에 대한 분석

Part II에서는 항공기가 비행을 하면서 받아들인 intensity 영상을 사용해 이들로부터 현재 비행위치의 고도정보를 추출하는 부분이다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 빛의 밝기정보를 갖는 intensity 영상으로부터 고도정보를 추출하는 과정이 필요하며, 이 과정이 스테레오 정합과정이다. 이 과정을 거쳐서 얻어진 고도지도(REM)는 참고고도지도와 정합을 하기 위해서 Part I에서 수행한 cliff map 추출과정과 critical point 추출과정을 거치게 된다.

4.1 스테레오 정합과 성긴 표면의 보간

이번 절에서는 광학적으로 얻어진 intensity 영상들로부터 어떻게 3차원 정보를 뽑아낼 것인가에 대한 문제를 Grimson(1981, 1985)과 Terzopoulos(1986) 등이 제안한 방법을 중심으로 다루어 보겠다.

Intensity 영상으로부터 3차원 정보(지형의 고도정보)를 뽑아내는 과정이 스테레오 정합과정이다. 항공기가 비행을 하면서 촬영한 두 장의 연속 영상은 epipolar 조건을 만족하는 스테레오 영상의 좌측영상과 우측영상으로 간주할 수 있다. Fig. 3과 같은 좌표계에서 왼쪽 영상의 한 점(x_L, y_L)에 대응하는 오른쪽 영상의 한 점이(x_R, y_R)이라 한다면, 다음과 같은 관계식

을 얻을 수 있다.

$$x_L = \frac{fx}{z} \dots\dots\dots(2)$$

$$x_R = \frac{f(x-b)}{z} \dots\dots\dots(3)$$

$$y_L = y_R = \frac{fy}{z} \dots\dots\dots(4)$$

단, f는 focal length이고 b는 base line의 길이이다. 위에서 주어진 식들을 각각 x, y, z에 대해 풀어보면,

$$x = \frac{bx_L}{x_L - x_R} = \frac{bx_L}{d} \dots\dots\dots(5)$$

$$y = \frac{by_L}{x_L - x_R} = \frac{by_L}{d} \dots\dots\dots(6)$$

$$z = \frac{bf}{x_L - x_R} = \frac{bf}{d} \dots\dots\dots(7)$$

이 된다. 이 때 d는 disparity로 $d = x_L - x_R$ 로 정의되는 값이며, 물리적으로는 인간시각에서 두 눈의 시차와 같은 의미를 갖는다. 위의 식들로부터 우리가 알 수 있는 것은 (7)식에서 b와 f의 값은 카메라 및 영상취득 조건에 의해 결정되는 값이므로, 두 영상의 disparity값 d를 구하면 3차원 정보인 z값을 구할 수 있다.

일반적으로 스테레오 정합방법은 크게 3가지 단계로 구성되며, 이들 단계는 1) 특징점 추출, 2) 왼쪽 영상과 오른쪽 영상의 특징점 정합, 3) 3차원 정보 복원 및 보간이다. 첫번째 단계인 특징점 추출에서는 왼쪽 영상과 오른쪽 영상의 정합되는 부분을 찾기 위한 정합점들을 추출하는 단계이며, 영상 전체에 대한 정합보다 특징점들에 대한 정합이 더 간단하고 계산량도 작으므로 이러한 특징점 추출단계가 필요하다. 우리가 영상으로부터 얻을 수 있는 특징(경계점, 동일 영역, 극점 등)들은 무수히 많으며, 이들 중 정합에 사용할 수 있는 특징들도 상당

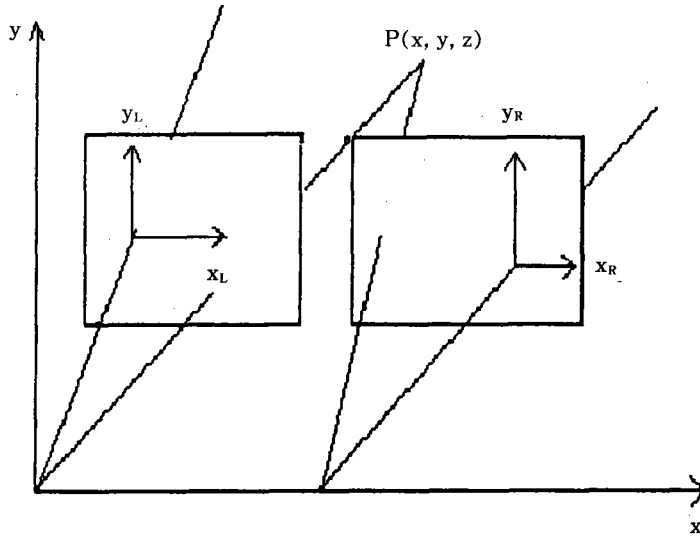


Fig. 3. Stereo Image Model.

히 많다. 그러나 이러한 특징들 중에서 간단하게 구할 수 있으며, 비교적 정확한 정합결과를 줄 수 있는 특징을 선택하는 것이 중요하다. 그래서 Grimson(1985) 등은 여러 가지 장점을 가지며, 일반적으로 많이 사용되고 있는 경계점들을 특징점으로 사용하였다. 경계 검출을 위해서는 앞에서 설명한 LoG 연산자를 사용하고, 또한 경계점들을 계층적으로 검출함으로써 여러 단계의 특징점들을 얻게 되며, 이러한 단계적 특징점들을 정합에 사용하여 좀더 정확한 정합을 수행하게 된다.

두번째 단계인 특징점 정합과정의 결과로 disparity값을 결정하게 되며, 마지막 단계로 3차원 정보의 복원 및 보간과정을 거쳐 나온 결과는 복원고도정보인 REM(Recovered Elevation Map)이 된다.

Fig. 6의 성긴 깊이정보로부터 Fig. 7의 조밀한 깊이정보를 얻기 위해 수행하는 과정이 깊이정보 보간과정이다. 이 과정에서는 인접한 데이터의 깊이정보들은 서로 연속성을 만족해야 한다는 제한조건을 사용하여 정합된 깊이정보로부터 정합되지 않은 위치의 깊이정보들을 만들어 내게 된다(Terzopoulos 1986).

4.2 REM에 대한 cliff map과 극점의 추출

REM에 대한 cliff map과 극점의 추출은 앞에서 설명한 DEM에서의 과정과 동일하며, 추출 결과도 동일한 효과를 나타낸다.

5. Part III에 대한 분석

본 절의 목적은 지형 정합에 있으므로 이미 알고 있는 DEM에서 항공 영상으로부터 얻은 REM의 위치와 방향을 알아내기 위해서는 이에 적합한 3차원 정합 알고리즘이 필요하다.

3차원 물체 인식을 위한 고전적 접근을 Gaussian 곡률(Gaussian curvature)이 큰 점들을 찾아내고, Goldof(1988) 등이 연구한 point-wise 정합방법을 사용하며, 3차원 지표에 대한 정확한 표현이 지형 자료로 사용될 경우 큰 곡률값은 정확하고 쉽게 찾아질 수 있다.

본 연구의 경우는 미지의 3차원 영상을 표현하는 데 연속적인 항공영상의 분석으로부터 얻어진 성긴 disparity map을 사용하였다. Disparity map의 성김과 표면보간(interpolation)시 생긴 에러로 인해서 정확한 3차원 곡률의 표현은 불가능하다. 이러한 이유 때문에 REM과 DEM으로부터 구해진 cliff map을 사용하게 된다.

5.1 극점 주위의 비교(critical point neighborhood comparison)

DEM과 REM의 정합 결과를 안다면 관측자의 위치와 회전정도를 알 수 있다. 정합 알고리즘의 첫번째 부분은 주위 비교(neighborhood comparison) 단계이다. 이 단계에서 REM의 각각의 점들은 DEM의 각각의 점들과 비교된다. 극점과 주위의 평균자승 에러가 문턱치보다 작을 때 정합되었다고 가정한다. 실제로 정합이 되었다고 보여지는 임계점 쌍들은 몇 개밖에 나오지 않는다. 정합된 극점들의 위치와 회전정도를 구하기 위해 다음과 같은 REM의 정합된 극점들의 2차원적 좌표 표현의 집합을 $R=\{R_i\}$ 로 나타내면,

$$R_i = \begin{bmatrix} x_i^R \\ y_i^R \end{bmatrix} \dots\dots\dots (8)$$

이고, 여기서 x_i^R 와 y_i^R 은 REM의 i 번째 극점의 좌표이다. 마찬가지로 DEM 내의 극점들의 집합을 $D=\{D_i\}$ 로 나타낸다. REM의 i 번째 임계점의 회전을 θ_i^R 로 나타내고 DEM의 j 번째 임계점의 회전은 θ_j^D 로 나타낸다. 여기서 회전은 정규화된 체인 코드(smoothed unwrapped resampled chain code)에서 이웃의 평균값으로 나타내면 가정된 회전은 다음과 같이 주어진다.

$$\Delta \theta = \theta_j^D - \theta_i^R \dots\dots\dots (9)$$

이 때 회전 행렬은 다음과 같이 얻을 수 있으며,

$$\phi = \begin{bmatrix} \cos \Delta \theta & -\sin \Delta \theta \\ \sin \Delta \theta & \cos \Delta \theta \end{bmatrix} \dots\dots\dots (10)$$

가정된 회전 행렬이 계산되면 변환(translation)은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$T = D_j - \phi R_i \\ = \begin{bmatrix} x_j^D - x_i^R \cos \Delta \theta & -y_i^R \sin \Delta \theta \\ y_j^D - x_i^R \sin \Delta \theta & -y_i^R \cos \Delta \theta \end{bmatrix} \dots\dots\dots (11)$$

각각의 변환이 결정되면 정렬성 검토를 해야 한다.

5.2 정렬성 검토(alignment check) 및 일괄성 검토(consistency check)

가정된 변환은 한 쌍의 극점에 기초한다. 그러므로 정렬성 검토는 다른 극점의 정합도 살펴보는 것이다. REM의 극점을 좌표변환을 해서 DEM에 겹친다. 변환된 좌표축을 $R'=\{R_i'\} = \{\phi R_i + T\}$ 로 나타내면 ϕ 와 T 는 가정된 변환에서 사용된 값이다. 정렬성 검토의 목적은 두 자료를 겹쳤을 때 가정된 변환이 적합한가를 판단하는 데 있다. 이 점을 알아보기 위해 각각의 가정된 변환에 대해 정렬점수(alignment score)를 구한다. 정렬점수는 동일한 회전하에서 DEM 극점 근방에 있는 변환된 REM 극점의 비로 나타낸다. $R_i' \in R'$ 과 $D_i \in D$ 에 대해 90° 내의 회전 변환을 가지고, 또한 다섯 화소 이내의 차이($\|R_i' - D_i\|$)를 가질 때 근방에 있다고 판정한다. 여기서 구한 정렬점수가 30%를 넘으면 가정된 변환은 잘 정돈(alignment)되었다고 판단한다.

정렬성 검토가 끝나면 일괄성 검토(consistency check)가 필요하다. 이것은 수많은 임계점 쌍들이 정렬성 검토를 통과하는 것과 같다. 이 마지막 검토의 목적은 최종적으로 확실한 변환을 구하는 것이다. 정렬된 두 변환 $T_1=(\Delta\theta_1, \Delta x_1, \Delta y_1)$ 과 $T_2=(\Delta\theta_2, \Delta x_2, \Delta y_2)$ 가 있을 때 이러한 변환들이 일괄성을 갖기 위해서는 정렬성 검토를 통과한 각각의 회전량(θ)과 이동량(x, y)이 서로 유사한 특성을 가져야 하므로, 이들 각각의 회전량과 이동량의 차가 작아야 한다. 따라서 이들의 일괄성을 검토하기 위해서는 이들 차이를 구하여 각각이 어떤 문턱치보다 작은지를 판단하여 일괄성을 만족하는 변환을 구하게 된다.

6. 실험 결과 및 토의

본 논문의 실험에 사용한 영상은 합성영상으로, Fig. 4에 보여진 3차원 깊이정보(DEM)로부터 Lambertian surface를 가정하여 shape from shading 기법(Grimson 1981)을 이용해 intensity 영상을 합성하였으며, 항공기로부터 얻어졌다고 가정한 스테레오 영상의 크기는 128×128 이고, 8 bits로 양자화한 영상을 사용하였다.

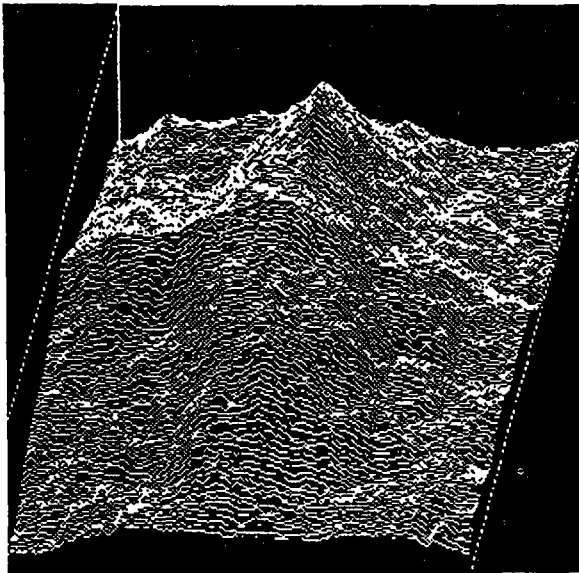


Fig. 4. DEM(Digital Elevation Map).

Fig. 5는 입력으로 사용한 스테레오 영상의 좌우측 영상이며, shape from shading 기법에 의해 Fig. 4의 DEM으로부터 합성된 영상이다.

Fig. 6은 Fig. 5의 영상을 입력으로 하여 스테레오 정합과정을 거쳐서 얻어진 성긴 깊이정보로 참고고도지도와 정합을 하기 위해서는 보간기법(Terzopoulos 1986)을 사용하여 Fig. 7

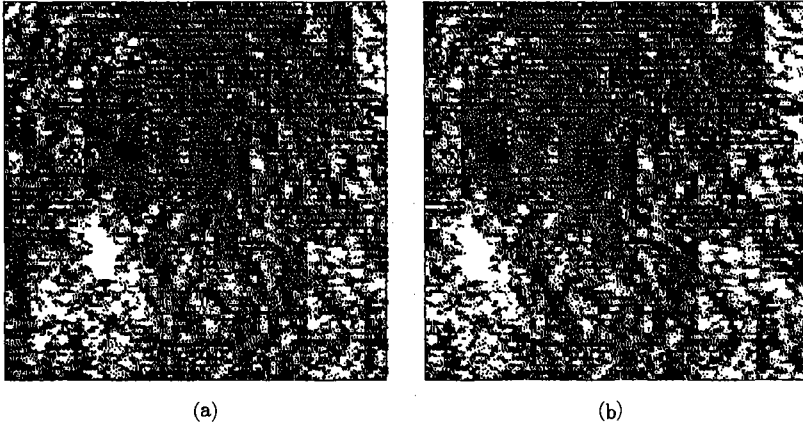


Fig. 5. Stereo Images for Simulation.

(a) Left Image. (b) Right Image.

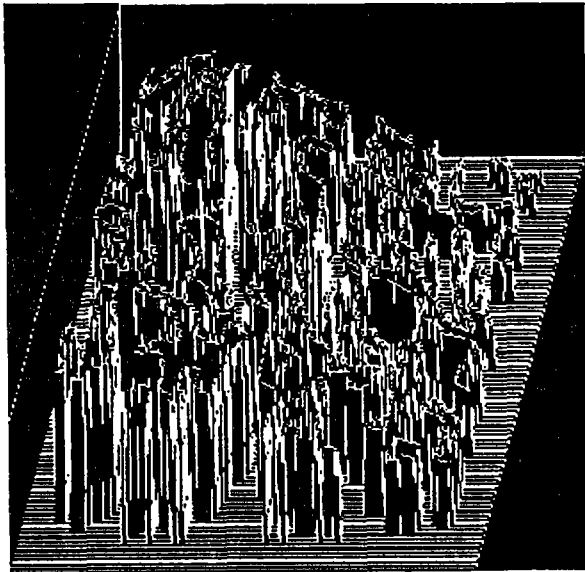


Fig. 6. Sparse Depth Information.

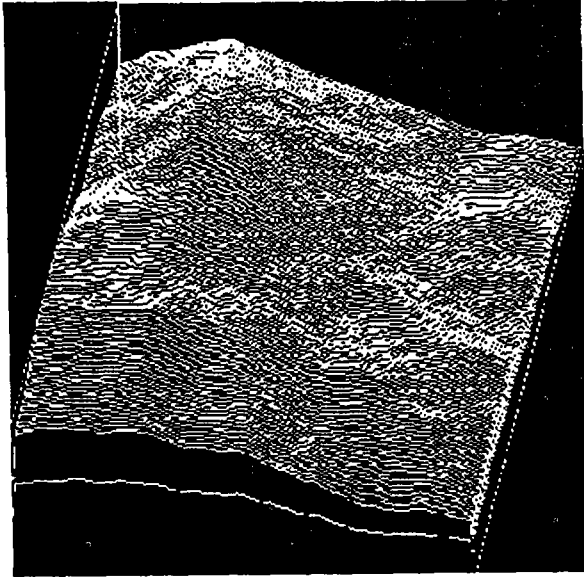


Fig. 7. Dense Depth Information.

의 조밀한 깊이정보를 얻게 된다.

Fig. 8은 Fig. 7의 영상으로부터 얻어진 cliff map과 이의 critical point를 나타내는 그림이다.

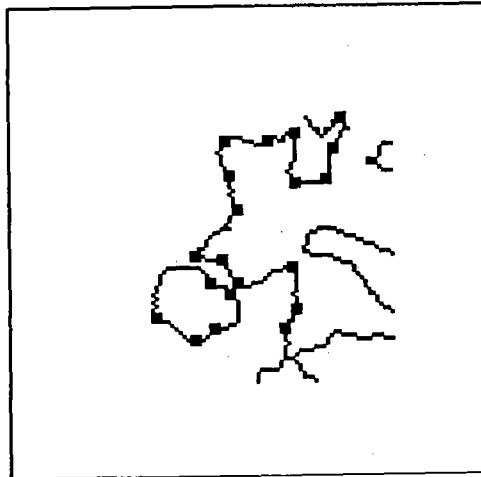


Fig. 8. Cliff Map and Critical Points.

Fig. 9는 참고고도지도의 critical point와 입력영상으로부터 얻어진 cliff map의 critical point를 정합하여 최종적으로 얻어진 정합결과를 참고고도지도(DEM)의 cliff map에 겹쳐서 나타낸 그림이다. 이 결과에서 보듯이 정합결과는 비교적 정확한 정합을 수행했다는 것을 볼 수 있으며, 이 때 정합된 결과는 DEM 내에서의 REM의 정합된 위치(x, y)와 회전된 정도를 나타내는 회전량(θ)의 형태로 출력되므로, 이러한 정량적인 양을 사용해 비행체의 DEM 내에서의 비행방향과 현재의 위치를 인지할 수 있으며, 비행속도와 비행고도에 대한 결과도 산출할 수 있다.

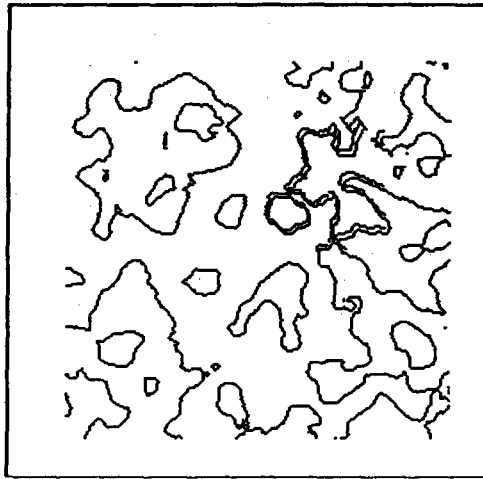


Fig. 9. Matching Result.

7. 결론

본 논문에서는 DEM을 사용한 영상합법 알고리즘에 대해 알아보았다. 이 방법은 intensity 영상으로부터 얻어진 3차원 깊이정보와 3차원 지형정보(DEM)를 정합하므로 관측자의 위치와 방향에 대한 정보를 추출할 수 있으며, 자동합법 시스템에서 유효하게 사용될 수 있다. 또한, cliff map과 critical point를 사용하므로 지형을 표현하거나 관측자의 위치를 계산하는 데 있어서 데이터 표현의 압축성과 계산량의 감소를 가져오므로 실시간 처리가 쉬워지며, 정합 알고리즘이 병렬처리에 적합하므로 하드웨어 구현에 용이함을 얻을 수 있다. 그러나 특징점 정합을 위해 cliff map과 critical point를 사용한다 하더라도 스테레오 정합과정에서의 계산량

5이 워낙 방대하기 때문에 시스템 전체적으로 볼 때 실시간 처리를 하는 데 많은 어려움이 있으므로, 이에 대한 계산량 감축기법에 대한 연구가 좀더 필요하다. 그리고 스테레오 정합과정이나 cliff map과 critical point를 검출하는 과정에서 잡음에 강한 연산자를 사용하기 때문에 알고리즘 자체가 잡음에 강한 특성을 가진다는 장점이 있다.

참고문헌

- Goldof, D. B., Huang, T. S., and Lee, H., 1988, Feature extraction and terrain matching, *Proc. IEEE-CS Conf. Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 899–904.
- Grimson, W. E. L., 1985, Computational experiments with a feature based stereo algorithm, *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, vol. PAMI-7, pp. 17–34.
- Grimson, W. E. L., 1981, *From Images to Surfaces*, Cambridge, MA: MIT Press.
- Marr, D. and Hildreth, E., 1980, Theory of edge detection, *Proc. Roy. Soc. London*, vol. B-207, pp. 187–217.
- McKee, J. W. and Aggarwal, J. K., 1987, Computer recognition of partial views of curved objects, *IEEE Trans. Comput.*, vol. C-26, pp. 790–800.
- Rodriguez, J. J. and Aggarwal, J. K., 1990, Matching aerial images to 3-D terrain maps, *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, vol. 12, pp. 1138–1149.
- Shahraray, B. and Anderson, D. J., 1985, Uniform resampling of digitized contours, *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, vol. PAMI-7, pp. 674–681.
- Terzopoulos, D., 1986, Regularization of inverse visual problems involving discontinuities, *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, vol. PAMI-7, pp. 410–421.