

선소의 추출과 그룹화를 이용한 원격탐사영상에서 건물 지붕의 복원

예철수* · 전승현** · 이호영** · 이쾌희**

극동대학교 정보통신학부*, 서강대학교 전자공학과**

Building Roof Reconstruction in Remote Sensing Image using Line Segment Extraction and Grouping

Chul-Soo Ye*, Seung-Heun Jeon**, Ho-Young Lee**, and Kwae-Hi Lee**

School of Information Telecommunication, Far East University*

Dept. of Electronic Engineering, Sogang University**

Abstract : This paper presents a method for automatic 3-d building reconstruction using high resolution aerial imagery. First, by using edge preserving filtering, noise is eliminated and then images are segmented by watershed algorithm, which preserves location of edge pixels. To extract line segments between control points from boundary of each region, we calculate curvature of each pixel on the boundary and then find the control points. Line segment linking is performed according to direction and length of line segments and the location of line segments is adjusted using gradient magnitudes of all pixels of the line segment. Coplanar grouping and polygonal patch formation are performed per region by selecting 3-d line segments that are matched using epipolar geometry and flight information. The algorithm has been applied to high resolution aerial images and the results show accurate 3D building reconstruction.

Key Words : Edge Preserving Filtering, Watershed Algorithm, Coplanar Grouping.

요약 : 본 논문에서는 고해상도의 항공 영상으로부터 건물의 3차원 정보를 자동으로 생성하는 방법을 제안하였다. 먼저 에지 보존 필터를 사용하여 영상에 포함된 잡음을 제거한 후에 watershed 기법을 이용하여 에지의 위치를 보존하고 영상 분할을 수행한다. 분할된 영역의 경계선에 위치한 화소의 곡률을 계산하여 control point를 검출하고 control point 사이의 선소를 추출한다. 추출된 선소들의 방향과 길이를 고려하여 선소의 연결을 수행하고 최종적으로 화소의 그레디언트 크기를 이용하여 선소의 위치를 조정한다. 공면의 그룹화와 다각형 조각을 형성하는 과정은 각 영역에 대해 공선 기하학과 비행 정보를 이용하여 정합된 3차원 선소들을 선택하여 이루어진다. 항공 영상에 제안한 방법을 적용하여 건물 지붕을 정확하게 검출할 수 있음을 보였다.

1. 개요

고해상도 항공 영상으로부터 건물의 3차원 정보를 자동적으로 생성하는 방법은 스테레오 비전의 방법을 이용하여 다른 시점에서 취득된 고해상도의 스테레오 영상으로부터 건물 구조의 3차원 정보를 복원하는 것이다. 건물의 3차원 정보는 도시 공학, 토목, 국방, 지형 등 각종 응용 분야에서 매우 중요하게 사용되는 자료이다. 일반적으로 항공 영상에 존재하는 건물의 형태는 매우 다양하기 때문에 항공 영상으로부터 건물의 3차원 정보를 자동으로 복원하는 것은 어려운 작업이다. 건물의 추출과 관련하여 초기에 수행된 연구들은 건물을 검출하기 위해 주로 한 장의 항공 영상에서 간단한 건물 모델과 그림자 정보를 이용하여 건물을 검출하고 건물의 2-d 윤곽선을 찾는데 집중되었다 (Huertas and Nevatia, 1988; Irvin and Mckeown, 1989). 건물의 높이를 구하기 위해서 다른 영상에서 검출된 구조물을 정합하는 방법도 제안되었다 (Mohan and Nevatia, 1989; Lee and Lei, 1990). 건물의 형태에 대해 사각형 모양 등과 같은 간단한 기하학적 규칙성을 가정하는 초기 연구에서는 건물 후보의 수를 감소시킬 수는 있었지만 여전히 모호한 결과를 보이는 경우가 많았다. 최근에는 스테레오 항공 영상을 이용하여 건물을 복원하는 여러가지 방법들이 제안되었다. 건물이 사각형 형태인 경우(Krishnamachari and Chellappa, 1994), 파라미터 형태로 표현되는 경우(Weidner, 1996; Braun *et al.*, 1995; 예철수와 이쾌희, 2000)에 대한 다양한 연구가 수행되었다. 특히 일반적인 형태의 건물을 복원하기 위해서 3차원 선소를 그룹화하는 방법이 연구되었다(Henricsson *et al.*, 1996; Frere *et al.*, 1997).

3차원 선소를 그룹화하는 방법은 일반적으로 건물의 지붕을 다각형 평면 조각들의 집합으로 가정하고 먼저 영상의 특징을 추출하고 추출된 특징들을 연속적으로 그룹화하여 건물의 지붕을 3차원으로 나타낸다. 이 방법은 건물 일부가 차폐가 된 경우를 제외하고는 건물의 형태에 대한 제

약 조건이 적어 다양한 건물에 적용할 수 있는 장점이 있다. 이와 관련된 기존의 연구에서 Bignone은 3차원 선소들이 평면상에 위치하는지를 확인하기 위해 2차원 영상에서 기하학적으로 서로 관련이 있는 3차원 선소들에 대해 공간상의 동일 평면에 위치하는 여부를 확인하는 과정과 공간상의 기하학적 관계를 만족시키는 3차원 선소들을 그룹화하는 방법을 제안하였다. 한편, Frere는 에지들에 대한 constraint triangulation을 구성하고 유사한 밝기값을 가지는 인접한 삼각형들을 서로 합치는 방식으로 동일 평면에 해당하는 영역을 확장시킨 후에 선소들의 3차원 정보를 이용하여 동일 평면에 속하는 선소들을 찾아내는 방법을 제안하였다.

Bignone과 Frere의 방법과 같이 영상의 특징으로 사용되는 에지를 추출하고 추출된 에지를 그룹화하는 건물 복원 방법이 갖는 문제점은 연속적인 에지가 끊어지는 현상이 발생할 수 있다는 점과 추출된 에지들을 그룹화하는 추가적인 과정이 필요로 한다는 점이다. 반면에 영역기반의 영상 분할을 수행하면 영역 사이의 경계선 해당되는 에지가 끊어지는 현상을 피할 수 있으며 동시에 영역과 경계선의 인접 관계를 이용할 수 있는 장점이 있다.

본 논문에서는 다양한 형태를 가지는 건물을 복원하기 위해서 건물의 지붕을 다각형 평면 조각

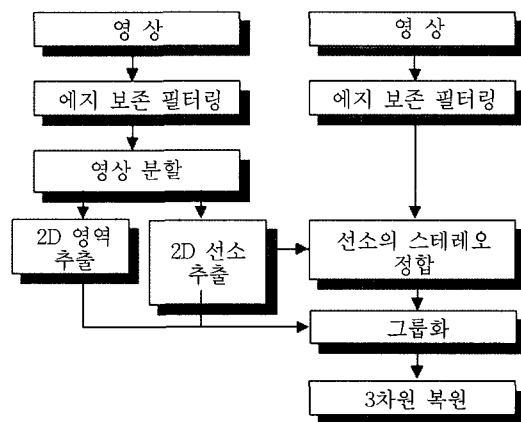


Fig. 1. Flow chart of proposed 3-d building reconstruction.

들의 집합으로 모델링하고 복원하는 방법을 제안한다 (Fig. 1). 제안하는 방법은 건물 지붕의 평면 조각에 해당하는 영상의 영역을 추출한 후에 영역의 경계선 선소들의 3차원 정보를 스테레오 정합을 통해 구하고 평면 조각의 3차원 정보를 획득한다. 따라서 제안하는 방법은 영역 추출을 통해 경계선 에지들을 자동으로 그룹화하는 결과를 얻을 수 있으며 스테레오 정합을 통해 건물 지붕의 평면 조각에 속하는 선소들을 자동으로 그룹화하는 장점이 있다.

2. 영역의 선소 추출

1) 영상 분할

에지의 위치를 보존하고 영상을 유사한 밝기값을 가지는 영역으로 분할하는 watershed 분석은 영상의 그래디언트를 조사하여 높은 그래디언트 화소와 낮은 그래디언트 화소들의 그룹으로 영상을 분할하는 유용한 방법이다(Vincent and Soille, 1991). 그러나 watershed 기반의 영상 분할 알고리즘을 적용한 영상은 매우 많은 수의 작은 영역들로 이루어지기 때문에 이들 작은 영역들을 합쳐서 보다 큰 영역을 얻는 과정을 필요로 한다. 본 논문에서는 Gauch가 제안한 방법(Gauch, 1999)으로 watershed를 계산하였으며 과도한 영상 분할 문제를 해결하기 위해 영상의 전처리 단계로 anisotropic diffusion의 일종인 평균 곡률 확산 (mean curvature diffusion) (Ye and Lee, 2001)을 이용하여 잡음을 제거하였다. 이 방법은 2차원 영상의 밝기값을 3차원 공간상의 z 좌표에 대응시켜 영상의 밝기값에 대응하는 공간 상의 곡면을 구성하고 이 곡면을 평균곡률에 비례하는 속도로 확산시킨다. 일반적으로 에지 부근에서는 확산속도가 느리고 잡음의 영향이 많은 비에지에서는 확산속도가 빠르기 때문에 에지의 위치를 보존하고 잡음을 효과적으로 제거하여 영상 분할시 잡음에 의해 발생하는 작은 영역의 수를 감소시킨다. 보다 의미있는 분할 결

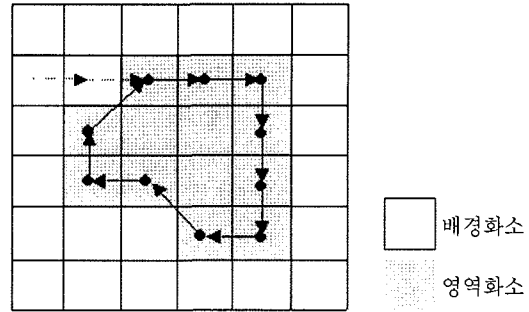


Fig. 2. Boundary represented by 8-directional chain code.

과를 얻기 위해 RAG(region adjacency graph)을 이용하여 유사한 영역들을 합치는 과정을 적용하였다(예철수와 이쾌희, 2002).

2) 영역의 경계선 추출

영역의 경계선은 다음과 같이 구한다. 영상을 스캔하면서 임의의 라벨을 가진 영역의 화소를 만나면 이 화소를 기준으로 진행방향의 왼쪽으로 145도 방향에서 오른쪽으로 145도 방향으로 3(3)장틀 내의 화소들을 조사하여 현재 화소의 라벨과 같은 화소를 최초로 만나면 이 화소를 다음 진행 방향의 화소로 결정하고 위치를 옮긴다. 이 과정을 반복하여 처음 위치로 돌아오면 마친다 (Fig. 2). 이때 지나온 화소들의 위치는 최초의 화소를 기준으로 8-connected chain code로 저장한다.

경계선 추출에서 얻어진 체인 코드를 이용하여 직진성을 갖는 화소들을 검출하기 위해서는 경계선 체인 코드에 대한 이산 곡률을 조사하여 곡률이 큰 점 (control point)을 찾고 이 점들 사이를 연결하는 과정이 필요하다. 함수 $y(x)$ 에 대한 곡률은 다음과 같이 정의된다.

$$\kappa(x) = \frac{|y''(x)|}{(1+(y'(x))^2)^{3/2}} \quad (1)$$

여기서

$$y'(x) = \frac{dy}{dx}, y''(x) = \frac{d^2y}{dx^2} \quad (2)$$

이다. 영상에서 얻어진 경계선은 일반적으로 $y=y(x)$

의 형태를 가질 수 없으므로 경계선을 파라미터 곡선 $c(t)=(x(t), y(t))$ 의 형태로 표현하면 곡률은

$$\kappa(t) = \frac{\dot{x}(t)\ddot{y}(t) - \ddot{x}(t)\dot{y}(t)}{(\dot{x}(t)^2 + \dot{y}(t)^2)^{3/2}} \quad (3)$$

이 된다. 여기서

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= \frac{dx}{dt}, \ddot{x}(t) = \frac{d^2x}{dt^2} \\ \dot{y}(t) &= \frac{dy}{dt}, \ddot{y}(t) = \frac{d^2y}{dt^2} \end{aligned} \quad (4)$$

이다. 이산 신호에 대한 미분은 일반적으로 양자화에 따른 오차를 포함하고 있으므로 식 (5)와 같이 $x(t)$, $y(t)$ 신호에 가우시안 필터를 적용한 후에 미분을 한다.

$$\begin{aligned} X(t, \sigma) &= x(t) * g(t, \sigma) \\ Y(t, \sigma) &= y(t) * g(t, \sigma) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서

$$g(t, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}} \quad (6)$$

이다. 따라서 식 (3)은

$$\kappa(t, \sigma) = \frac{\dot{X}(t, \sigma)\ddot{Y}(t, \sigma) - \ddot{X}(t, \sigma)\dot{Y}(t, \sigma)}{(\dot{X}^2(t, \sigma) + \dot{Y}^2(t, \sigma))^{3/2}} \quad (7)$$

과 같이 된다.

3) 선소의 연결과 위치 보정

추출된 경계선 선소를 실제 에지 위치에 놓이도록 하기 위해서 선소를 연결하고 선소의 위치를 조정하는 과정이 필요하다. Fig. 3의 (a)와 (b)는 같은 방향의 선소와 다른 방향의 선소의 결합 과정을 보여준다. Fig. 3의 (a)에서 같은 방향의 선소인 AB 와 CD 에 대해 아래 세가지 조건을 만족할 때 새로운 선소 AD 를 생성한다.

$$|\theta_1 - \theta_2| < T_{degree} \quad (8)$$

$$\frac{AB + CD}{AD} > T_{length} \quad (9)$$

$$d_1 < T_{dist} \text{ and } d_2 < T_{dist} \quad (10)$$

Fig. 3의 (b)와 같이 서로 다른 방향인 선소 AB

와 CD 사이에 작은 선소 BC 가 위치하는 경우에는 다음 조건을 만족할 때 두 선소 AH 와 HD 를 새롭게 생성한다.

$$AB + BC + CD > AH + HD \quad (11)$$

경계선 선소가 실제 에지 위치에서 조금 벗어나는 경우를 고려하여 Fig. 3 (c)에 보인 바와 같이 선소의 위치를 조정한다. 선소 AB 를 수직 방향으로 조금씩 이동하면서 매 위치에서 θ_1 각도 이내에서 조금씩 회전하면서 선소 AB 가 놓이는 위치의 최소 그레디언트의 평균을 구해서 최대가 되는 위치를 찾는다. 이 과정은 모든 선소에 대해 수행되며 보정한 후에 변화가 없는 선소는 추출된 선소의 위치가 실제 에지 위치에 놓인 것으로 간주한다.

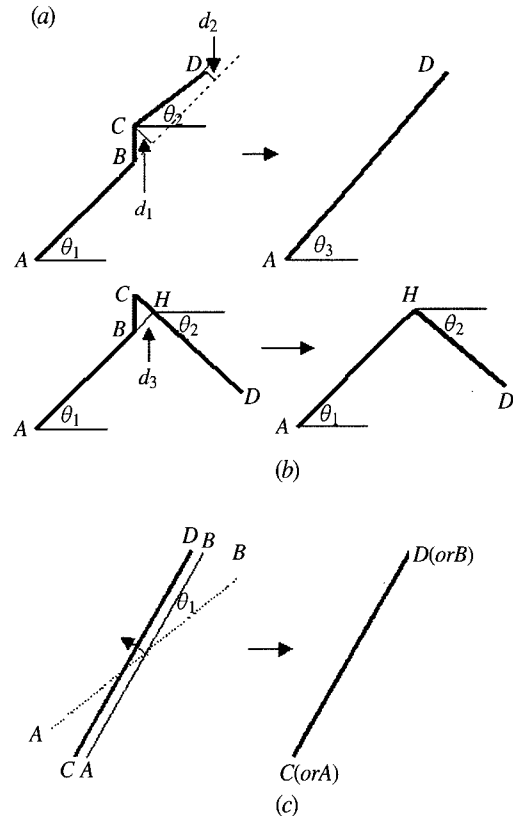


Fig. 3. (a) and (b) Line segment linking performed according to direction and length of line segment (c) adjustment of line segment location using gradient magnitudes of all pixels of the line segment.

3. 선소의 정합 및 3차원 그룹화

1) 공선조건을 이용한 스테레오 정합

기준 영상에서 추출한 선소에 대해 카메라 정보를 이용하여 후보 영상의 공선을 계산하고 공선 위를 조금씩 움직이면서 각각의 위치에서 일정한 각도 이내에서 가상의 선소를 회전시키면서 에지 측정합수를 계산하고 최대값을 가지는 위치와 방향을 찾아서 정합 선소를 결정한다. 에지측정합수는 가상의 선소 위에 위치하는 화소들의 그래디언트 크기에 그래디언트 방향에 따른 가중치를 곱한 값의 평균으로 계산된다 (예철수와 이쾌희, 2000).

후보 영상에서 탐색 영역을 줄이기 위해 제약 조건으로 공선 조건을 사용한다. 핀 홀 카메라 모델에서 기준 영상의 카메라의 위치와 자세를 $(x_L, y_L, z_L), (\omega_L, \phi_L, \kappa_L)$ 라 하고 후보 영상의 카메라의 위치와 자세를 $(x_R, y_R, z_R), (\omega_R, \phi_R, \kappa_R)$ 라 하고 회전 행렬로 식 (12), 식 (13)과 같이 나타내자.

$$M_L^T = R(\omega_L, \phi_L, \kappa_L) \quad (12)$$

$$M_R^T = R(\omega_R, \phi_R, \kappa_R) \quad (13)$$

기준 영상과 후보 영상의 정합점을 (u_L, v_L) 와 (u_R, v_R) 라 하고 f_L 와 f_R 는 기준 영상의 카메라와 후보 영상의 카메라의 초점 거리라고 할 때 영상의 정합점 사이에 다음의 관계가 성립한다.

$$\begin{pmatrix} x_R - x_L \\ y_R - y_L \\ z_R - z_L \end{pmatrix}^T \left[M_R \begin{pmatrix} u_R \\ v_R \\ f_R \end{pmatrix} \times M_L \begin{pmatrix} u_L \\ v_L \\ f_L \end{pmatrix} \right] = 0 \quad (14)$$

따라서 기준 영상의 한 점 (u_L, v_L) 이 주어지면 후보 영상의 정합점의 좌표 u_R 와 v_R 는 직선의 방정식으로 표현된다.

2) 3차원 그룹화

선소의 스테레오 정합을 통해서 얻어진 3차원 선소들에 대해 동일 평면 상에 위치하도록 하는 그룹화 과정을 수행한다. Bignone은 3차원 선소들이 평면상에 위치하는지를 확인하기 위해 2차원

영상에서 기하학적으로 관련이 있는 3차원 선소들에 대해서 동일 평면에 위치하는 여부를 먼저 확인하고 평면 위에 존재하는 조건을 만족하는 에지와 코너를 평면에 포함시키는 방법을 제안하였다. Frere가 제안한 방법은 에지들에 대한 constraint triangulation을 구성하고 유사한 밝기값을 가지는 인접한 삼각형들을 서로 합치는 방식으로 동일 평면에 해당하는 영역을 확대해 나간다. 영역에 속하는 선소들의 3차원 정보를 이용하여 동일 평면에 속하는 선소들을 찾아낸다.

에지 기반의 접근 방식을 취하고 있는 앞의 두 가지 방법은 에지의 기하학적 관계를 이용한 추가적인 그룹화 과정을 필요로 한다. 그러나 본 논문에서 제안한 영상 분할 방법을 이용하면 건물의 지붕에 해당하는 영역과 선소와의 관계에 대한 정보를 이용할 수 있으므로 동일 평면에 속하는 선소들을 찾을 때 동일 영역에 속하는 선소들에 대해서만 고려하여 3차원 그룹화하는 장점이 있다.

영역의 3차원 선소들로 근사화된 평면을 구하는 과정은 다음과 같다. 근사화된 평면을

$$z_p(x_i, y_i) = c_1 x_i + c_2 y_i + c_3 \quad (15)$$

과 같이 표현하자. 여기서 (x_i, y_i) 는 영역의 3차원 선소들의 시작과 끝 점들의 좌표이며 $z_p(x_i, y_i)$ 는 근사화된 평면의 높이이고 c_i 는 평면의 파라미터이다. 영역에 속하는 3차원 선소들의 시작 점과 끝 점의 총 개수를 n 이라 하고 (x_i, y_i) 에서의 높이를 $z(x_i, y_i)$ 하면 총 자승 오차 (total squared error) $E(c)$ 는

$$E(c) = \sum_i (z(x_i, y_i) - (c_1 x_i + c_2 y_i + c_3))^2 \quad (16)$$

$$= (Z - HC)^T (Z - HC)$$

과 같이 표현된다. 여기서 $Z = [z(x_1, y_1), \dots, z(x_n, y_n)]^T$, $C = [c_1, c_2, c_3]^T$ 이고

$$H = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_i & y_i & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n & y_n & 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

이 된다. 총 자승 오차를 각 파라미터에 대해 미

분한 후 영으로 놓으면 추정하고자 하는 파라미터는 \hat{C}

$$\hat{C} = (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{Z} \quad (18)$$

이 되고

$$\mathbf{H}^T \mathbf{H} = \begin{bmatrix} \sum_i x_i^2 & \sum_i x_i y_i & \sum_i x_i \\ \sum_i x_i y_i & \sum_i y_i^2 & \sum_i y_i \\ \sum_i x_i & \sum_i y_i & n \end{bmatrix}, \mathbf{H}^T \mathbf{Z} = \begin{bmatrix} \sum_i x_i z(x_i, y_i) \\ \sum_i y_i z(x_i, y_i) \\ \sum_i z(x_i, y_i) \end{bmatrix} \quad (19)$$

이 된다.

3차원 선소를 평면으로 근사화하는 앞의 과정을 다음과 같이 네 단계로 나누어서 수행한다.

1) 영역에 속하는 가장 긴 두개의 선소를 선택한다.

2) 두 선소의 수직 거리가 임계 거리보다 작으면 최소 자승법을 이용하여 두 선소로 이루어지는 평면의 방정식을 계산한다.

3) 2)의 조건을 만족하지 않으면 다음으로 긴 선소를 선택해서 과정 2)를 반복한다.

4) 2)의 조건을 만족하면 영역내의 다른 선소에 대해서 과정 2)에서 가정한 평면과의 수직 거리가 임계 거리보다 작으면 평면의 방정식을 갱신한다.

위의 4)번 과정을 통해서 선소의 오정합에 의해 임계 거리 이상인 선소는 그룹화 과정에서 제거된다.

IV. 실험 결과

실험에 사용한 항공 영상은 Avenches 데이터 (Mason *et al.* 1994)에서 건물이 포함된 영상의 일부분을 사용하였다. 총 4장씩 60%가 겹쳐있는 항공 영상이며 고도 750m에서 취득한 칼라 영상이다. 영상의 크기는 1800×1800 화소이며 1화소 당 15cm (실제 지상 영역은 7.5cm×7.5cm)의 정확도를 가지고 있다. 또한 카메라의 초점 거리와 회전 행렬에 관한 정보가 함께 주어져 있다. Fig. 4는 항공 영상에 포함된 건물 중에 가장 복잡한 형태의 지붕을 가진 건물이며 총 5개의 지붕으로 구성되어 있다. 실험 영상에 대해 에지 보존 필터링, 영상 분할, 선소의 추출, 선소의 정합, 그룹화 등의 각 단계를 적용할 때에 임계값 설정 이외의 모든 과정은 자동으로 수행하도록 하였다.

그림 Fig. 4(b)는 원 영상에 대해 에지 보존 필터링을 적용한 결과 영상이다. 지붕의 내부에 존재하는 작은 밝기 변화는 제거되고 경계선 정보는 유지되고 있음을 알 수 있다. 에지 보존 필터링을 적용한 영상은 다음 단계의 영상 분할 과정에서 영상이 지나치게 많은 영역으로 분할 되는 것을 방지해 준다. Fig. 5는 watershed을 이용하여 영상을 분할한 결과 영상과 분할된 영상에서 서로 다른 영역의 경계선에 위치한 화소를 에지로 표시한

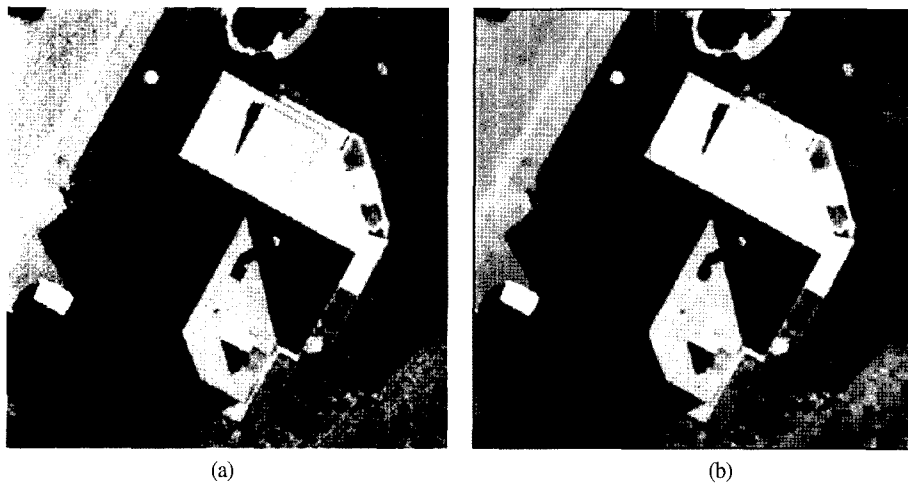


Fig. 4. (a) An example of aerial image from the Avenches data set (b) mean curvature diffusion filtered image.

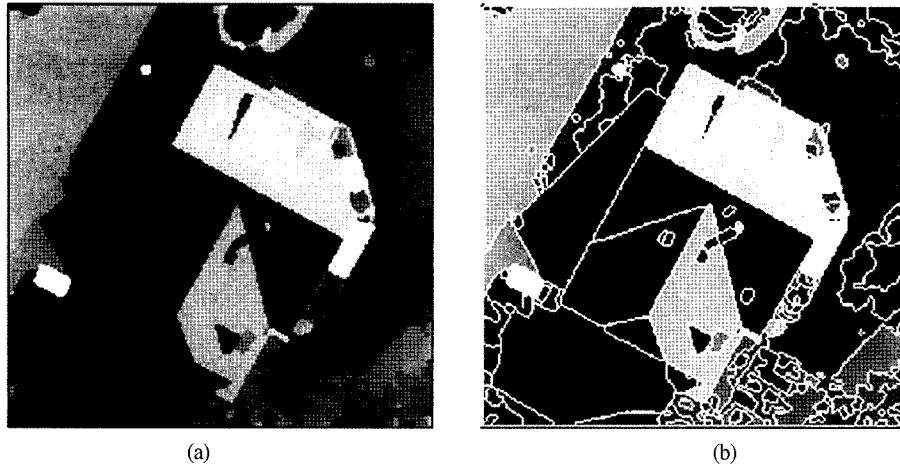


Fig. 5. Image segmentation result (a) after watershed segmentation (b) edge detection result of the image in (a).

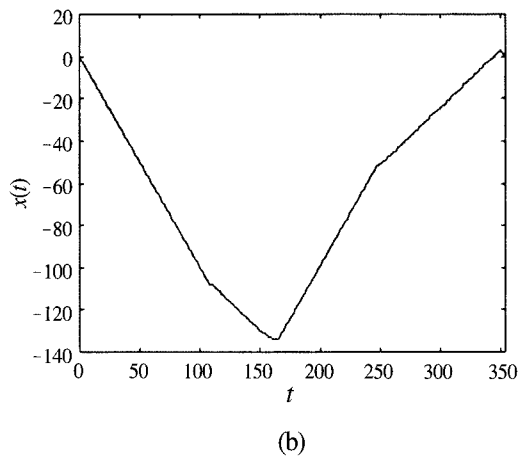
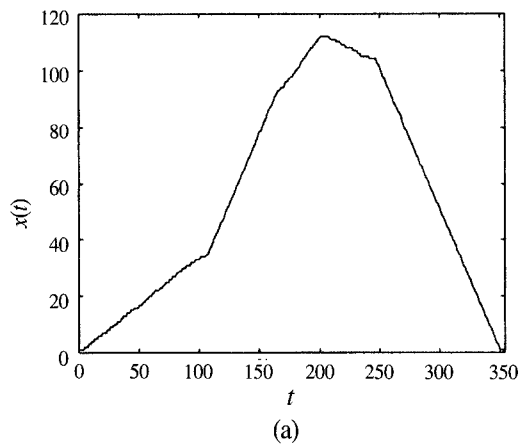


Fig. 6. Projections of the contour (a) (b).

결과이다.

영역의 경계선에 해당하는 선소들을 검출하기 위해서 지붕 영역의 경계선을 파라미터 곡선 $c(t) = (x(t), y(t))$ 으로 표현하고 x 축, y 축으로 투영한 결과는 Fig. 6(a)와 (b)와 같다. 가우시안 필터링을 $x(t)$, $y(t)$ 신호에 적용한 후에 곡률을 구한 결과는 Fig. 7과 같다.

임계값 이상의 곡률을 가지는 화소를 control point로 삼고 control point 사이의 선소 중에서 충분히 길고, 직진성을 보이는 선소를 검출하기 위해 각 영역에 대해 선소의 전체 길이, control point의 개수와 control point사이의 평균 길이를 임계값

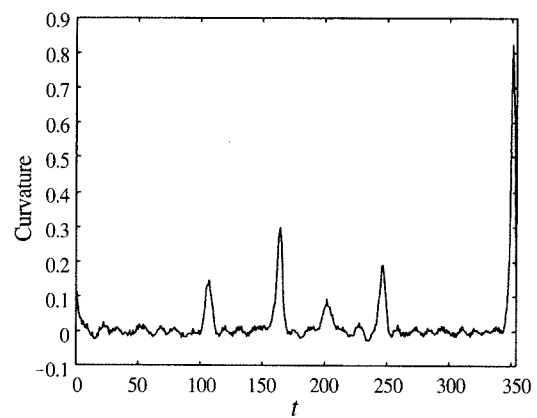


Fig. 7. Curvature plot of contour.

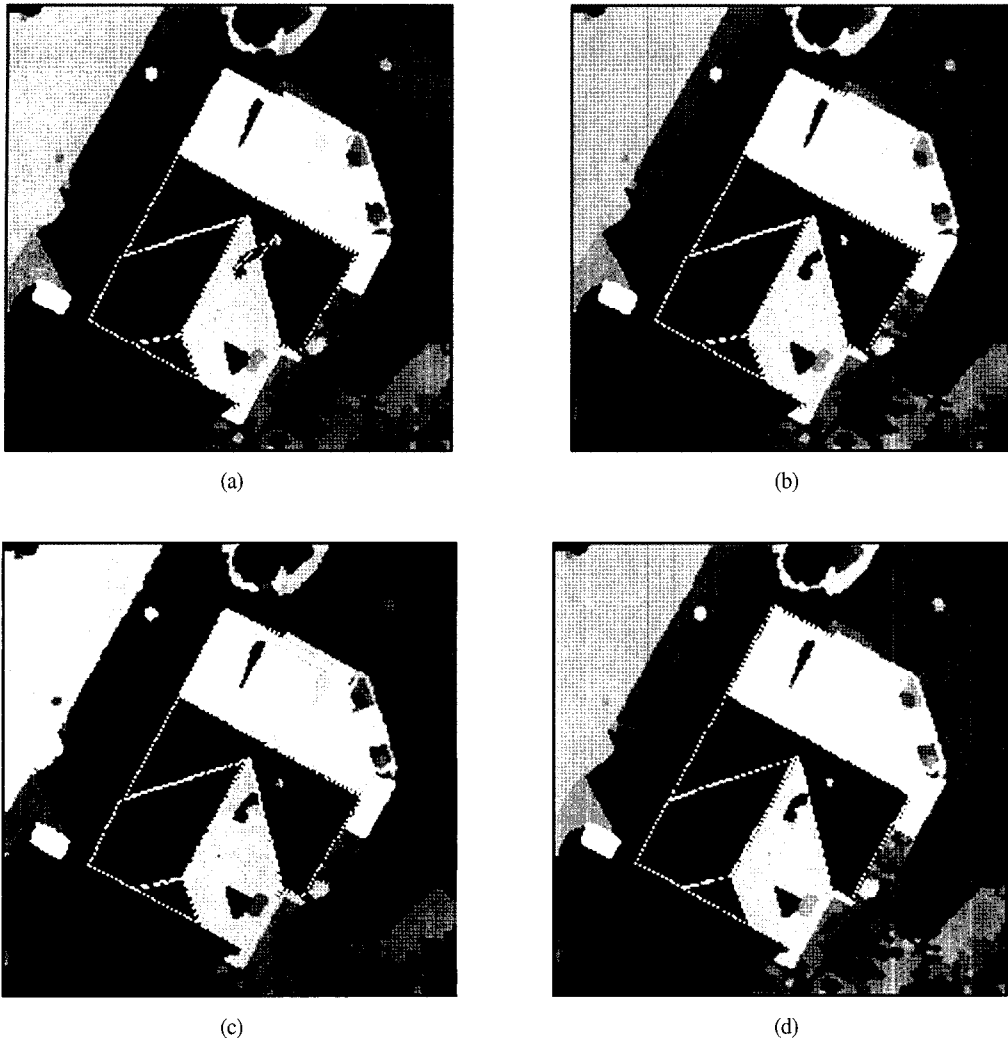


Fig. 8. Line segment extraction result of building 1 (a) extracted roof boundaries (b) merging between line segments with similar direction (c) merging between line segments in vertical position (d) position correction of line segment.

으로 하여 정합 후보 선소의 개수를 감소시켰다. 건물 지붕 선소와 지붕 이외의 선소와의 최종적인 구분은 정합에서 얻어진 3차원 정보와 지표의 높이를 비교하여 결정한다.

Fig. 8(a)는 항공 영상에서 추출된 건물 후보 선소를 보여주고 있다. 기존의 영역 확장 등의 방법이나 에지 기반의 그룹화 방법으로는 건물의 지붕에 해당하는 영역의 경계선을 부분적으로만 그룹화 할 수 있지만 제안한 방법은 영상 분할 결과가 closed 영역으로 나타나기 때문에 3차원 선소를

공간상에서 평면으로 근사화하는 단계에 사용되어야 할 선소들을 쉽게 구분할 수 있다.

같은 방향을 갖는 여러 개의 작은 선소들은 선소 결합을 통해서 새로운 하나의 긴 선소를 형성한다 (Fig. 8(b)). 다른 방향의 선소 결합을 통해서 건물 지붕의 모서리 부분에서의 코너점을 정확하게 결정할 수 있다 (Fig. 8(c)). 선소의 보정을 통해서 건물 지붕의 에지 위에 선소가 놓이는 것을 알 수 있다 (Fig. 8(d)). Fig. 8(d)의 선소에 대해 후보 영상에서 정합된 선소는 Fig. 9

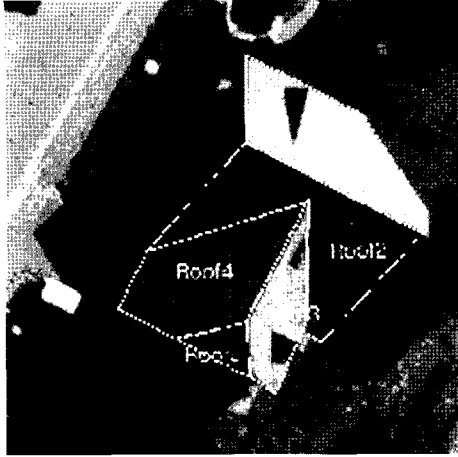


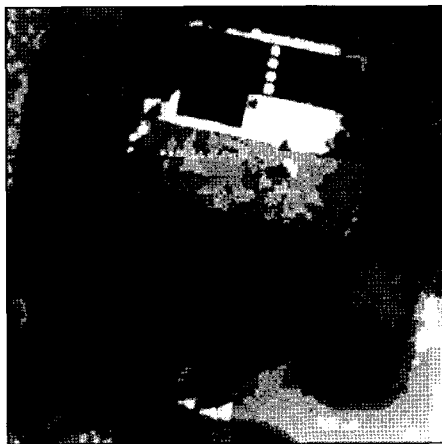
Fig. 9. Matched line segments after stereo matching for the building roof in Fig. 8.

Table 1. Accuracy achieved by coplanar grouping for building 1[m].

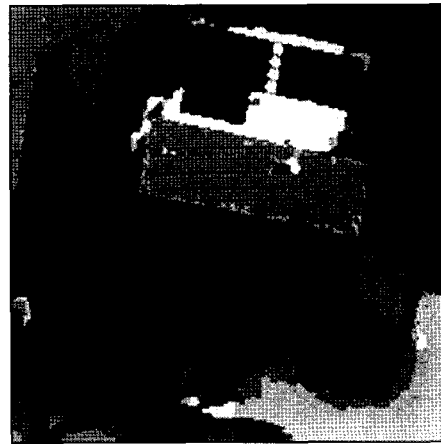
	ΔX 표준편차	ΔY 표준편차	ΔZ 표준편차	코너점 rms
Roof1	0.047626	0.014323	0.059894	0.119034
Roof2	0.077918	0.050872	0.281247	0.478326
Roof3	0.054813	0.050974	0.104225	0.199977
Roof4	0.085045	0.079969	0.236697	0.303200
Roof5	0.074063	0.052919	0.056030	0.770119

와 같다.

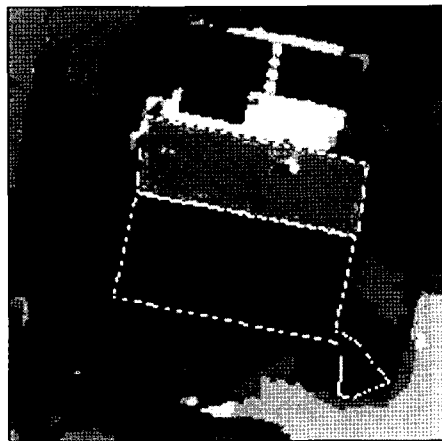
건물 지붕의 3차원 복원 결과의 정확도는 Table 1과 같다. X, Y, Z축에 대해 기준 코너점의 좌표와 복원된 코너점의 좌표 값의 차 $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ 에 대한 표준 편차와 복원된 평면과 기준 코너점과의 거리



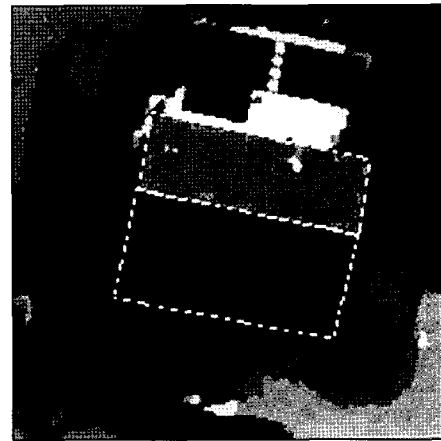
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 10. Line segment extraction result of building 2 (a) mean curvature diffusion filtered image (b) image segmentation result (c) extracted roof boundaries (d) result of line segment merging and position correction.

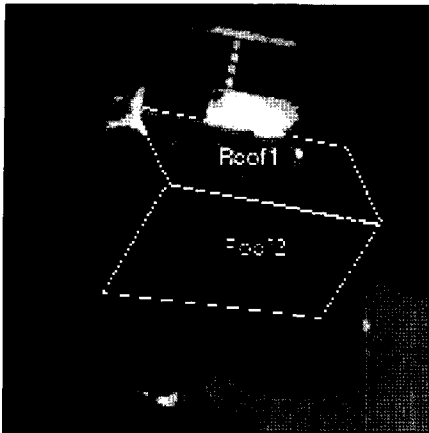


Fig. 11. Matched line segments after stereo matching for the building roof in Fig. 10.

Table 2. Accuracy achieved by coplanar grouping for building 2[m].

	ΔX 표준편차	ΔY 표준편차	ΔZ 표준편차	코너점 rms
Roof1	0.022440	0.139770	0.306485	0.272925
Roof2	0.049983	0.084923	0.171839	0.228895

에 대한 rms 값을 구하였다. 각 지붕의 ΔX 의 표준 편차는 4.7cm에서 8.5cm이내에, ΔY 의 표준 편차는 1.4cm에서 7.9cm이내에 속하고 ΔZ 의 표준 편차는 5.6에서 28cm이내에 속한다. 복원된 평면과 지붕의 코너점 사이의 거리에 대한 rms 는 12cm에서 77cm이내에 속한다.

제안한 방법으로 얻어지는 건물 지붕 선소의 3차원 좌표는 건물의 폭, 길이, 높이, 위치에 관한 정보를 분석하여 constructive solid geometry(CSG) 모델을 생성하여 도심 지역에 대한 3차원 분석을 수행하는 데에 활용될 수 있다.

다른 건물에 대한 선소 추출 결과와 정합 결과는 Fig. 10과 Fig. 11과 같다. 영상 분할 후에 영역의 경계선 일부가 정확하게 추출되지 않아도 선소의 결합과 보정을 통해 건물 지붕의 선소를 올바르게 추출할 수 있음을 볼 수 있다. 복원된 건물의 정확도는 Table 2에서 보는 바와 같이 코너점에 대해서 30cm 이내의 rms 값을 가진다.

V. 결론

건물의 형태에 대한 제약조건을 최소화하고 다양한 형태의 건물에 대한 복원을 위해서 다면체 형태의 건물 모델을 이용하여 건물을 복원하는 방법을 제안하였다. 스테레오 영상을 입력으로 받아서 에지를 보존하면서 영상에 포함된 잡음을 제거하여 영상 분할 단계에서 나타나는 작은 영역의 수를 감소시킨 후에 watershed 방법을 이용하여 에지의 위치를 보존하고 동시에 영상을 유사한 밝기값을 가지는 영역들로 분할하여 건물 지붕에 해당하는 영역에 대해 closed 영역을 얻을 수 있었다. 영상을 분할한 후에 분할된 영역의 경계선에 위치한 화소들의 곡률을 계산하여 control point를 검출하고 control point 사이의 선소를 추출하였다. 선소의 결합과 선소의 위치 보정을 통해서 영상 분할이 부분적으로 정확하지 않은 경우에도 건물 지붕의 선소를 정확하게 검출할 수 있었다. 영상 분할에서 얻어진 영역의 경계선에 위치한 선소들의 3차원 정보들을 이용하여 공간상의 평면을 구하고 같은 과정을 다른 영역의 3차원 선소들에 대해 수행하여 최종적으로 건물 지붕에 대한 3차원 정보를 획득할 수 있었다. 제안한 방법은 추출된 선소 길이가 충분히 길어서 선소 정합이 가능한 고해상도 위성 및 항공영상에 적용될 수 있으리라 사료된다.

사 사

이 연구는 2002년도 서강대학교 교내 연구비 지원에 의하여 이루어졌음을 밝힙니다. 그리고 논문의 내용을 보완하는데 도움을 주신 익명의 심사자 분들께 감사드립니다.

참고문헌

- 예철수, 이쾌희, 2000. 건물모델 및 선소 측정 함수를 이용한 건물의 3차원 복원, *대한전자공학회논문지*, 37-SP(4): 46-55.
- 예철수, 이쾌희, 2002. Hybrid 알고리즘을 이용한 원격탐사 영상의 분할, *대한원격탐사학회지*, 18(2): 107-116.
- Bignone, F., 1995. Segment stereo matching and coplanar grouping, *Technical Report BIWI-TR-165*, Institute for Communications Technology, Image Science Lab, ETH, Zurich.
- Braun, C., T. H. Kolbe, F. Lang, W. Schickler, V. Steinhage, A.B. Cremers, W. Forstner, and L. Plumer, 1995. Models for photogrammetric building reconstruction, *Computer & Graphics*, 19(1): 109-118.
- C. S. Ye and K. H. Lee, 2001. Anisotropic diffusion for building segmentation from aerial imagery, in *Proc. of International Symposium on Remote Sensing, EMSEA and KSRS, Seogwipo, Korea, Oct. 31-Nov. 2*, pp. 599-604.
- Frere, D., M. Hendrickx, J. Vandekerckhove, T. Moons, and L. Van Gool, 1997. On the reconstruction of urban house roofs from aerial images, *Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images (II)*, Birkhauser, Basel, pp. 87-96.
- Gauch, J. M., 1999. Image segmentation and analysis via multiscale gradient watershed hierarchies, *IEEE Trans. Image Processing*, 8(1): 69-79.
- H. J. Lee and W. L. Lei, 1990. Region matching and depth finding for 3-d objects in stereo aerial photographs, *Pattern Recognition*, 23: 1-94.
- Henricsson, O., F. Bignone, W. Willuhn, F. Ade, O. Kubler, E. Baltsavias, and S. Mason, 1996. Project AMOBE: Strategies, current status and future work, in *XIX Congress of ISPRS, Comm. III, Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vienna*, 31: 321-330.
- Huertas, A. and R. Nevatia, 1988. Detecting buildings in aerial images, *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 41: 131-152.
- Irvin, R. B. and D. M. Mckeown, 1989. Methods for exploiting the relationship between buildings and their shadows in aerial imagery, *IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics*, 19(6): 1564-1575.
- Krishnamachari, S. and R. Chellappa, 1994. An Energy minimization approach to building detection in aerial images, *ICASSP*, 5: 13-16.
- Mason S., E. Baltsavias, and D. Stallmann, 1994. High precision photogrammetric data set for building reconstruction and terrain modeling, *Internal Report*, Institute of Photogrammetry and Geodesy.
- Mohan, R. and R. Nevatia, 1989. Using perceptual organization to extract 3-d structures, *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, 11(11): 1121-1139.
- Vincent, L., and P. Soille, 1991. Watersheds in digital spaces: An efficient algorithm based on immersion simulations, *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, 13(6): 583-598.
- Weidner, U. 1996. An approach to building extraction from digital surface models, in *XIX Congress of ISPRS, Comm. III, Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vienna*, 31: 924-929.