

# 건물모델 정규화를 적용한 항공라이다의 3차원 건물 모델링

## 3D building modeling from airborne Lidar data by building model regularization

이정호<sup>1)</sup> · 가칠오<sup>2)</sup> · 김용일<sup>3)</sup> · 이병길<sup>4)</sup>

Lee, Jeong Ho · Ga, Chill Oi · Kim, Yong Il · Lee, Byung Gil

### Abstract

3D building modeling from airborne Lidar without model regularization may cause positional errors or topological inconsistency in building models. Regularization of 3D building models, on the other hand, restricts the types of models which can be reconstructed. To resolve these issues, this paper modelled 3D buildings from airborne Lidar by building model regularization which considers more various types of buildings. Building points are first segmented into roof planes by clustering in feature space and segmentation in object space. Then, 3D building models are reconstructed by consecutive adjustment of planes, lines, and points to satisfy parallelism, symmetry, and consistency between model components. The experimental results demonstrated that the method could make more various types of 3d building models with regularity. The effects of regularization on the positional accuracies of models were also analyzed quantitatively.

Keywords : Building reconstruction, 3D modeling, Regularization, Roof segmentation, Airborne Lidar

### 초 록

건물모델의 정규화 없이 3차원 건물 모델링을 하면 건물모델에 왜곡이 발생하거나 위상적 불일치가 발생할 수 있다. 반면에, 정규성을 고려할 경우 제약조건으로 인하여 재구성이 가능한 건물 유형이 제한적일 수 있다. 이에 본 연구에서는 보다 다양한 건물을 고려한 건물모델 정규화 방법을 적용하여 항공라이다 데이터로부터 3차원 건물을 모델링하였다. 우선 특징공간에서의 군집화와 객체공간에서의 분할을 통해 건물점들을 지붕면으로 분할한다. 건물모델 구성요소 간의 평행성, 대칭성, 일치성 등을 충족시키기 위하여 면-선-점의 순차적 조정에 의한 정규화를 통해 3차원 건물을 재구성한다. 도시 지역에 대한 실험을 통해 기존의 방법들보다 다양한 형태의 건물에 대하여 정규성을 충족하는 3차원 모델을 생성할 수 있음을 확인하였다. 또한, 정규화가 건물모델의 정확도에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다.

핵심어 : 건물 재구성, 3차원 모델링, 정규화, 지붕 분할, 항공라이다

## 1. 서 론

다양한 분야에서 3차원 공간정보에 대한 요구가 증대되고 있으며 이를 위한 3차원 공간정보 생성 연구도 활발히 이루어지고 있다. 여러 가지 공간정보 중에서 건물 정보는 활용도가 가장 높은 요소 중 하나이다. 항공라이다

데이터는 높은 수직 정확도의 3차원 정보를 광역 공간에 대해 제공하기 때문에 항공라이다를 이용한 3차원 건물 모델링이 국내외에서 활발히 연구되고 있다(Sampath 등, 2010; Kim 등, 2011; 임새봄 등, 2009; 유은진 등, 2012).

3차원 건물 모델링 기법은 모델 기반 방법(model driven method)과 데이터 기반 방법(data driven method)으로 구분

1) 정희원 · 서울대학교 건설환경공학부 선임연구원(E-mail:ilome79@snu.ac.kr)

2) 서울대학교 건설환경공학부 박사과정(E-mail:crow75@snu.ac.kr)

3) 교신저자 · 정희원 · 서울대학교 건설환경공학부 교수(E-mail:yik@snu.ac.kr)

4) 정희원 · 경기대학교 토목공학과 조교수(E-mail:basil@kgu.ac.kr)

할 수 있다. 모델 기반 방법은 미리 정해진 형태의 건물 모델들 중에서 최적의 모델을 찾는 것이다(Weidner 등, 1995; Mass 등, 1999; Halla 등, 1998). 이 방법은 항상 위상적으로 일치하는 모델을 생성할 수 있지만 복잡한 형태의 건물에 대하여 적용하기 어렵다는 한계가 있다.

이에 반해 데이터 기반 방법은 다양한 형태의 건물에 대한 모델링이 가능하다는 장점이 있다. 데이터 기반 방법의 대부분은 건물의 지붕이 평면들의 조합인 다면체 모델(polyhedral model)이라는 가정 하에 건물점들을 각각의 지붕면을 구성하는 점들로 분할한다. 지붕면을 분할하는 대표적인 방법으로는 객체 공간상에서 가까이 위치하고 평면 조건을 만족시키는 점들을 동일한 평면에 포함하면서 평면 영역을 성장시키는 방법이 있다(Lee 등, 2001; Rottensteiner, 2003; Lin 등, 2010). 다른 방법으로는 법선 벡터나 평면방정식의 계수에 의하여 구성되는 특징 공간에서 클러스터링을 수행하거나(Vosselman, 1999; Kim 등, 2008; Filin 등, 2006; Sampath 등, 2010) 3차원 허프변환을 이용하기도 한다(Vosselman 등, 2001; 이영진 등, 2008).

분할된 지붕면들로부터 3차원 건물 모델을 재구성하는 방법을 정규성의 고려 정도(제약 조건)에 따라 구분해보면, 건물 구성 요소들(면, 선, 점) 간의 일치성, 평행성, 직교성 등 정규성을 고려하는 방법과 고려하지 않는 방법으로 나눌 수 있다. 정규성을 고려하지 않는 방법들은 특정 제약 조건 없이 각각의 지붕면들에 대하여 개별적으로 경계선을 생성하거나(Alharthy 등, 2004; 조홍범 등, 2008) 건물 전체의 경계에 대하여 일반화를 통해 경계선을 생성한다(Kim 등, 2011). 최종 단계에서는 일치성을 높이기 위하여 가까이 위치하는 점들을 이동하거나 병합한다. 몇몇 연구자들은 건물 경계선들 간의 직교성만을 고려하여 건물 모델을 재구성하였다(Dorninger 등, 2008; Sampath 등, 2010). 이상의 방법들은 다양한 형태의 다면체 모델을 원시 데이터와 최대한 유사하게 생성할 수 있으나 건물 모델의 정규성을 충족시킬 수 없으며 데이터에 포함된 오차나 점들의 분포 상태에 따라 건물 모델에 왜곡이 발생하거나 위상적으로 일치하지 않는 모델이 생성될 수 있다는 단점이 있다.

건물의 정규성을 고려하는 연구들을 살펴보면, Vosselman(1999)은 인접 지붕면이 없는 선분(step edge)을 건물의 주방향에 평행 또는 수직으로 조정하는 방법을 제안하였고, Rottensteiner 등(2005)은 step edge의 정규화와 조정에 대한 아이디어를 제시하고 하나의 건물에 대하여 그 효과를 시각적으로 보여주었다. Verma 등(2006)은 건물

모델을 지붕마루(ridge)와 처마(cave)의 높이가 각각 동일한 몇 가지 유형의 지붕이 조합된 건물들로 가정하고 건물 모델의 정규성을 충족시킬 수 있는 재구성 방법론을 제안하였다. 이상의 연구들을 종합해보면 건물 모델의 정규성을 충족시키는 방법들은 건물을 단순한 형상으로 제한하고 있기 때문에 다양한 건물들이 존재하는 환경에서 이를 적용하기에 한계가 있다. 한편, 정규성을 고려함으로써 그렇지 않았을 때보다 3차원 건물 모델이 정량적으로 어느 정도 향상되는지에 대한 연구가 없다.

본 연구에서는 보다 다양한 형태의 건물을 고려한 3차원 건물 모델의 정규화 기법을 적용한 건물 재구성을 통하여 항공라이다 데이터로부터 3차원 건물을 모델링하였다. 지붕면 분할 단계에서는 법선벡터의 특징공간에서 차감 클러스터링과 퍼지 클러스터링을 통해 방향이 동일한 지붕면을 군집화한 후, 평행면 분리와 평면 재병합 등의 객체 공간에서의 분할을 통해 지붕면을 분할한다. 재구성 단계에서는 건물 모델의 정규성을 충족시키기 위하여 면-선-점의 순서로 모델을 조정하여 정규화를 수행한다. 우선 서로 유사한 고도각과 방향각을 갖는 평면들을 동시에 조정하여 면들 간에 평행성, 대칭성 등을 만족하도록 한다. 각 면의 외곽점으로 생성되는 선분 세그먼트에 대하여 평면의 특성을 고려한 조정과 가상 벽면 조정 등을 수행하여 평행성, 직교성, 일치성 등을 높인다. 마지막으로 인접평면들의 교차를 통해 건물 모델을 구성하는 점들을 계산하고 서로 가까운 점들을 병합하여 일치성을 향상시킨다.

## 2. 건물 지붕면 분할

본 연구에서는 특징공간 군집화와 객체공간 분할을 통해 건물점들로부터 건물 지붕면을 분할한다. 특징공간 군집화 단계에서는 Sampath 등(2010)이 항공라이다 데이터의 지붕면 분할에 활용한 차감 클러스터링과 퍼지 평균 클러스터링 기법을 적용하고, 객체공간 분할 단계에서는 평면 간의 거리 및 점에서 평면까지의 거리 등을 활용한다.

### 2.1 특징 공간 군집화

항공라이다 포인트 클라우드에서 한 점이 주변점들과 형성하는 평면을 기반으로 각 점에 대한 법선벡터를 계산하고, 그림 1과 같이 벡터의 성분인 로 이루어지는 특징공간에서 군집화를 수행한다.

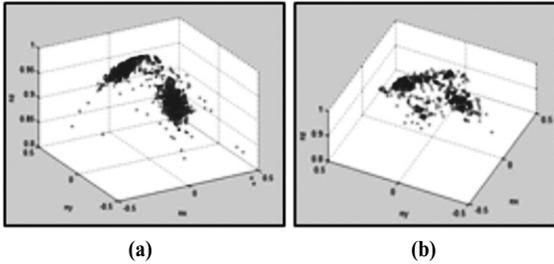


그림 1. 지붕면의 방향이 2개인 건물(a)과 4개인 건물(b)에 대한 특징공간에서 점들의 분포

차감 클러스터링은 클러스터의 개수나 중심을 모를 경우에 효과적인 방법이다(Chiu, 1994; Sampath 등, 2010). 특징공간에서 식 (1)과 같이 한 점에 대하여 나머지 점들과 거리 제곱에 반비례하는 함수값의 합을 퍼텐셜  $p_i$ 로 정의한다.

$$p_i = \sum_{k=1}^n \exp\left(-\frac{4}{r_a^2} \|N_k - N_i\|^2\right) \quad (1)$$

여기서  $N_i$ 와  $N_k$ 는 특징공간에서의 법선벡터를 의미하고,  $r_a$ 는 클러스터의 크기를 결정하는 값이다. 모든 점들에 대하여 퍼텐셜 값을 계산한 후, 가장 큰 퍼텐셜 값을 가지는 점이 첫 번째 클러스터의 중심( $N_m$ )으로 선택된다. 이전 클러스터들의 중심 근처에 위치하는 점들은 매우 작은 퍼텐셜 값을 갖도록 퍼텐셜  $p'_i$ 을 식 (2)와 같이 계산한 후, 가장 큰 퍼텐셜 값을 갖는 점을 다음 클러스터의 중심으로 선택한다.

$$p'_i = p_i - p_m \cdot \exp\left(-\frac{4}{r_b^2} \|N_i - N_m\|^2\right) \quad (2)$$

차감 클러스터링을 수행하면 각 건물에 대하여 유사한 법선벡터 그룹의 개수와 특징공간에서의 중심을 알 수 있다.

위에서 계산한 법선벡터 그룹의 개수와 중심을 초기값으로 퍼지 c-평균 클러스터링을 적용하여 방향이 유사한 평면을 구성하는 점들을 군집화한다. 퍼지 c-평균 클러스터링 기법에서는 하나의 데이터가 각각의 군집에 대한 비율로 여러 군집에 속하게 된다(Bezdek 등, 1984; Sampath 등, 2010). 보다 구체적으로,  $j$ 군집에 대한 가중평균은 식 (3)과 같이 계산하고 각각의 점을 가장 가까운 군집에 할당한다. 군집의 중심이 수렴할 때까지 이와 같은 연산을 반복한다.

$$C^j = \frac{\sum_{i=1}^n (w_i^j N_i)}{\sum_{i=1}^n w_i^j} \quad (3)$$

$w_i^j$ 는  $i$ 점의  $j$ 군집에 대한 가중치이고,  $n$ 은 총 점의 개수,  $N$ 은 각 점의 법선벡터이다. 본 연구에서는 분리도가 명확한 점들만을 우선 분리하기 위하여 최대 가중치가 0.6 이상인 점들만을 군집에 할당하고 이외의 점들은 보류점으로 분류한다.

## 2.2 객체 공간 분할

평행한 평면 및 동일한 평면방정식을 갖지만 공간적으로 분리되어있는 평면들은 동일한 법선벡터  $\vec{N} = (n_x, n_y, n_z)^T$ 를 갖기 때문에 특징공간에서의 군집화를 통해 하나의 그룹으로 형성된다. 이들을 분리하기 위하여 객체공간에서 원점으로부터 평면까지의 거리인  $d_i = n_x x_i + n_y y_i + n_z z_i$ 가 서로 유사한 점들을 동일한 그룹으로 분리한다. 객체공간에서의 군집화 단계에서 보류점으로 분류해냈던 점들을 직교거리가 최소인 평면에 할당한다.

동일한 평면방정식을 갖지만 공간적으로 떨어져있는 평면들은 원점에서 평면까지의 거리에 의하여 분리되지 않으므로 여전히 하나의 그룹으로 되어있다. 이들을 객체공간에서의 연결성에 의하여 다른 그룹으로 분리한다. 끝으로, 서로 연결성이 있고 거의 평행하면서 원점으로부터

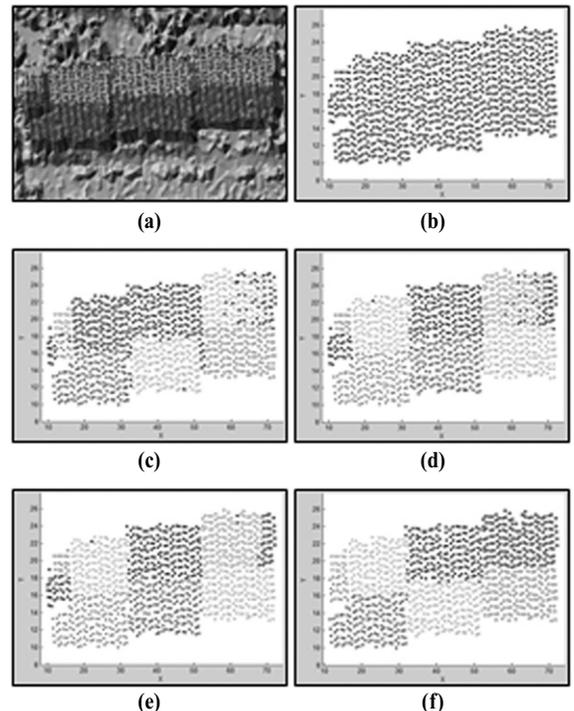


그림 2. 지붕면 분할: (a) 라이다 포인트, (b) 퍼지 c-평균 클러스터링, (c) 평행면 분리, (d) 보류점 할당, (e) 객체 공간 분할, (f) 동일평면 병합

평면까지의 거리 차이가 임계값 이내인 평면들을 다시 병합한다. 그림 2는 8개의 평면(2개 방향)으로 구성된 건물의 지붕면 분할 과정을 나타낸다.

### 3. 정규화를 통한 건물 재구성

#### 3.1 지붕면 조정

본 연구에서는 대칭성, 평행성, 직교성 등을 최대한 만족시키도록 법선벡터의 고도각이 유사하면서 방향각의 차이가  $n\pi/4$ 에 가까운 평면들을 동시에 조정한다. 법선벡터의 고도각이  $90^\circ$ 에 가까운 면(수평면)을 제외한 경사면들 중에서 점의 개수가 가장 많은 면을 기준면으로 설정하고, 기준면과 고도각이 유사하면서 방향각의 차이가  $n\pi/4$ 에 가까운 평면들을 선택한다.

그림 3과 같이 기준면을 그룹 1로 지정하고 기준면의 법선벡터와 방향각의 차이가  $(i-1)\pi/4$ 에 가까운 평면들을 그룹  $i$ 로 지정한다. 식 (4)와 같이 제약조건 하에 동시에 최소제곱 조정을 수행하여 각 평면의 법선벡터의 고도각은 같아지고 방향각은 정확히  $n\pi/4$ 를 이루도록 한다. 한편, 법선벡터 고도각이  $85^\circ$  이상인 평면은 고도각을  $90^\circ$ 로 조정한다.

$$\begin{bmatrix} L_1^1 \\ L_2^1 \\ \vdots \\ L_1^2 \\ \vdots \\ L_n^8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1^1 & 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ A_2^1 & 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ A_1^2 & 0 & 1 & 0 & & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ A_n^8 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c_1^1 \\ c_2^1 \\ \vdots \\ c_n^8 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1^1 \\ e_2^1 \\ \vdots \\ e_1^2 \\ \vdots \\ e_n^8 \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서  $L_j^i$ 와  $A_j^i$ 는 각각 식 (5), (6)과 같으며  $i$ 는 그룹번호를,  $j$ 는 한 그룹 내에서 평면번호를 의미한다.  $x, y, z$ 는 각각 한 점의 3차원 좌표 성분이다.

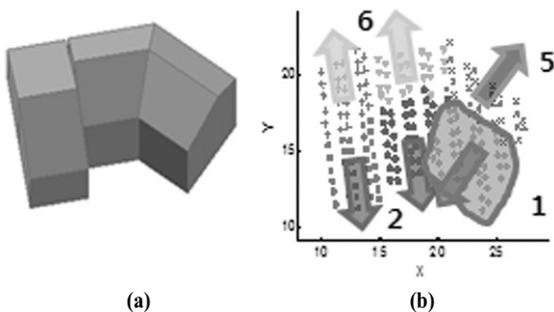


그림 3. 기준 지붕면과 지붕면 그룹 결정

$$L_j^i = [z_{j1}^i \ z_{j2}^i \ z_{j3}^i \ \cdots \ z_{j\epsilon}^i]^T \quad (5)$$

$$A_j^i = \begin{bmatrix} x_{j1}^i \cos \theta_i + y_{j1}^i \sin \theta_i & y_{j1}^i \cos \theta_i - x_{j1}^i \sin \theta_i \\ \vdots & \vdots \\ x_{jn}^i \cos \theta_i + y_{jn}^i \sin \theta_i & y_{jn}^i \cos \theta_i - x_{jn}^i \sin \theta_i \end{bmatrix} \quad (6)$$

#### 3.2 경계점 그룹화

각 평면별로 국지적 컨벡스헬 알고리즘을 적용하여 경계점을 추출하고 각 경계점의 인접 평면 정보를 계산한다. 지붕면의 경계점들에 단순히 일반화 알고리즘을 적용하면 작은 크기의 지붕면에서는 경계점들이 올바르게 그룹화될 수 있다. 이에 본 연구에서는 그림 4와 같이 인접평면이 변경되는 점(A)이나 인접평면의 유무가 변경되는 점(B)을 1차 특징점으로 추출한다(그림 4(b), (d)). Douglas and Peucker 알고리즘을 적용하여 인접평면이 없는 점들 사이에 존재하는 특징점을 2차 특징점(C)으로 추출한다(그림 4(c), (e)).

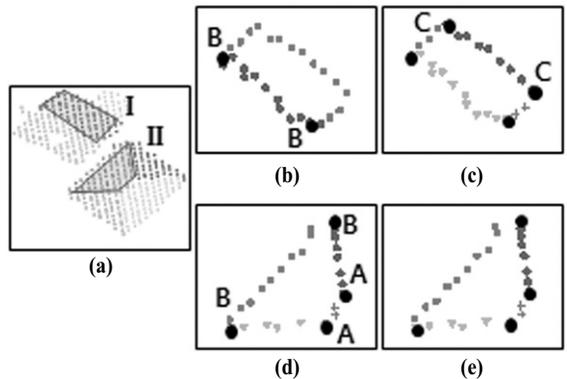


그림 4. 경계점 그룹화: (a) 분할된 지붕면 포인트, (b)와 (c) 평면 I의 1차, 2차 특징점, (d)와 (e) 평면 II의 1차, 2차 특징점

경계점들이 특징점에 의하여 각각의 세그먼트에 대응되는 그룹으로 나뉘지면, 한 세그먼트에 속하는 점들의 인접 평면의 최빈값을 그 세그먼트의 인접 평면으로 결정한다. 논문의 이후 부분에서는 각 평면의 경계 세그먼트 중에서 인접 평면이 있는 선분을 내부 세그먼트, 인접 평면이 없는 선분을 외부 세그먼트라고 기술한다.

#### 3.3 세그먼트 조정

경사면의 경계 세그먼트 중에서 인접 평면이 존재하지 않는 외부 세그먼트에 대해서는 양쪽 이웃 세그먼트의 특성(이웃 세그먼트의 방향과 인접 평면 존재 여부)에 따라

다른 제약조건을 주어 방향을 결정한다. 그림 5는 여러 형태의 지붕면에서 한 외부세그먼트(굵은 실선)의 방향을 조정하는 규칙을 보여주고 있다. 실선과 점선은 각각 외부세그먼트와 내부세그먼트를 의미한다.  $v_1, v_2$ 는 각각 평면의 법선벡터 방향과 그에 수직인 방향을,  $n_1, n_2$ 는 조정하려는 외부 세그먼트의 양 옆에 위치하는 내부 세그먼트의 방향을 의미한다. 한 외부 세그먼트의 방향 조정 규칙은 다음과 같다.

- ① 양쪽 이웃이 모두 외부 세그먼트  
→  $v_1, v_2$  중에서 유사한 방향으로
- ② 양쪽 이웃 중에 내부 세그먼트가 존재
  - a. 기타 방향인 내부 세그먼트가 존재  
→  $v_2, n_1, n_2$  중에서 유사한 방향으로
  - b. 이외의 경우  
→  $v_1, v_2, n_1, n_2$  중에서 유사한 방향으로

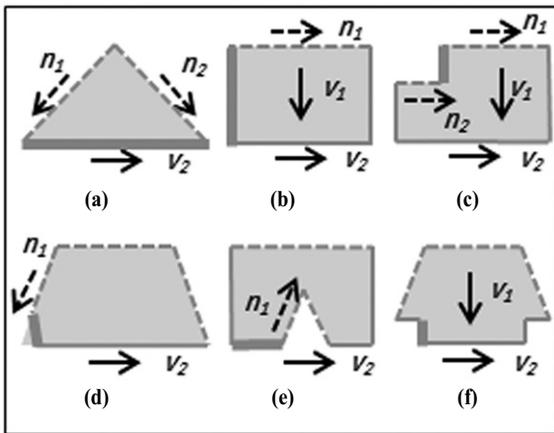


그림 5. 경사면의 외부 세그먼트 방향 결정

일반적으로 외부 세그먼트에 대해서 지면에 수직인 가상 벽면을 생성하는데, 본 연구에서는 대칭성과 일치성을 향상시키기 위하여 세그먼트의 방향에 따라 수평 또는 수직의 가상 벽면을 생성한다. 외부 세그먼트의 방향이  $v_1$  일 경우 법선벡터가  $v_2$  이고  $xy$  평면에 수직인 평면을, 외부 세그먼트의 방향이  $v_2$  일 경우  $xy$  평면에 평행한 평면을 생성한다.

가상 벽면을 생성한 후 이들 간에 존재하는 공간적 불일치를 제거하기 위하여 서로 평행하면서 일정 거리 이내에 위치하는 평면들을 조정한다. 벽면들 중에서  $xy$  평면과 평행한 평면들 중에서 평면들 간의 거리가  $\Delta d_v$  이하

인 평면들을 동일한 평면이 되도록 조정하며, 각각의 평면들에 대응되는 점의 개수에 따른 가중평균에 의하여 조정한다(그림 6(a)).  $xy$  평면과 수직을 이루는 평면들에 대해서도 평면들 간의 거리가  $\Delta d_H$  이하인 평면들을 조정한다(그림 6(b)). 단, 항공라이다 포인트는 수평 방향의 오차가 수직 방향 오차에 비하여 더 크고 수평 방향으로는 포인트가 어느 정도 간격을 갖고 분포하는 불확실성이 존재하므로  $\Delta d_H$ 는  $\Delta d_v$ 에 비하여 더 큰 값을 임계값으로 설정한다.

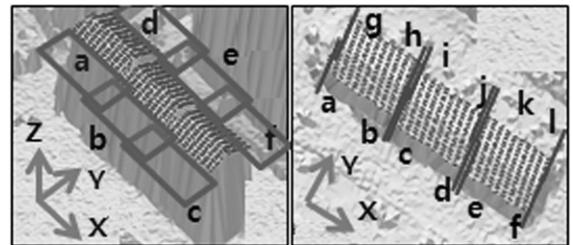


그림 6. 가상벽면 조정: (a)수평면 (b)수직면

### 3.4 점 조정 및 건물 모델 생성

각각의 평면에 대하여 점들과 선분들은 시계방향 순서로 저장되어 있으므로 하나의 평면 내에서 한 점은 연속하는 두 선분에 의하여 결정될 수 있다. 각각의 선분은 인접하는 평면이나 벽면에 대한 정보를 갖고 있다. 따라서 한 점에 대하여 교차하는 3개의 평면이 대응되므로 이들 간의 교차를 통해 각 점의 좌표를 구한다. 그림 7에서 점 I는 지붕면 A와 가상 벽면 a, b를 이용하여 계산된다.

한 건물을 구성하는 모든 점을 계산한 후 일치성을 향상시키기 위하여 서로 지나치게 가까이에 위치하는 점들

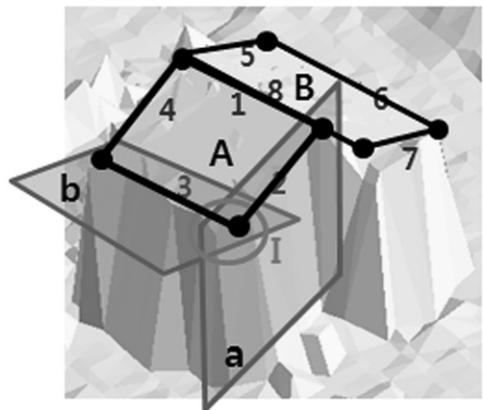


그림 7. 면의 교차를 통한 3차원 건물모델 생성

을 하나로 병합한다. 본 연구에서는 두 점의 거리가 0.5m 이내인 점들을 하나로 병합하였다.

## 4. 실험 및 결과

### 4.1 데이터 및 적용

100여 개의 건물을 포함하며 각각 다른 지형 및 건물 특성을 나타내는 대전 지역의 두 곳을 실험 지역으로 선정하였다. 지역 I, II의 면적은 각각  $770 \times 446m^2$ ,  $850 \times 492m^2$  이고, 점밀도는 각각 1.26(개/ $m^2$ ), 1.32(개/ $m^2$ )이다. 건물점들로부터 지붕면을 분할하고 3차원 건물 모델을 재구성하는데 적용한 임계값은 표 1과 같고, 전체 지역에 대한 실험 결과(지형 모델 및 3차원 건물 모델)는 그림 8과 같다.

차감 클러스터링에서 클러스터의 크기는 중심으로부터 0.1을 적용하였으며 이는 단위법선벡터 공간에서의 값으로서 약  $6^\circ$ 의 각도에 해당한다. 이 값과 차감 클러스터링의 종료 조건은 건물 지붕면의 최소 크기와 항공라이다 자료의 점밀도를 고려하여 경험적으로 설정하였다. 지붕면 분할에서의 최대 거리(오차점 제거, 평행면 병합)는 원시 자료의 오차를 고려하여 0.5m를 적용하였다. 평면 그룹화 단계에서 각도 차이는 실험 지역에 존재하는 여러 건물들에 대한 사전 지식과 반복실험을 바탕으로 설정하였다. 고

도각보다 방향각에 대한 임계값을 크게 적용한 이유는 크기가 작은 일부 평면들이 방향각에 대하여 더 큰 편차를 보였기 때문이다. 가상 벽면의 조정 단계에서는 항공라이다 자료의 점 간격과 오차를 고려하여 수평·수직 벽면에 대하여 각각 최대 거리를 0.5m, 1.5m를 적용하였다.

표 1. 건물경계 재구성에 적용된 임계값

항 목	임계값
차감 클러스터링에서 클러스터의 크기	0.1
차감 클러스터링 종료 조건	0.1 또는 20
지붕면 분할에서 최대 거리	0.5m
평면 그룹화 각도 차이 (고도각, 방향각)	$7^\circ, 15^\circ$
벽면 조정 시 최대 거리 (수직벽면, 수평벽면)	1.5m, 0.5m

### 4.2 시각적 분석

다양한 형태의 건물 10개(그림 9)에 대한 시각적 분석을 통해 본 연구의 3차원 건물 모델링 방법론을 평가하였다. 다양한 형태의 건물들에 대하여 건물모델 구성 요소들 간의 평행성, 대칭성, 직교성, 일치성 등을 만족하는 모델을 생성할 수 있었다. 지붕면들의 방향이 서로 수직 또는 평행이 아니거나 지붕 처마의 높이가 동일하지 않은 건물(그림 9의 A)에 대해서도 정규성을 충족시키는 모델을 재구성하여 정규성을 고려한 기존의 방법들보다 더 다양한 형태의 건물을 모델링할 수 있었다. 이는 기존의 정규성을 고려한 방법들이 주로 간단한 형태의 건물들만을 고려하여 제약 조건을 설정한데 반해(예: 경계선이 서로 수직, 처마의 높이가 일정), 제안 방법은 지붕면의 특성에 따라 외부 세그먼트의 방향을 제한하고 외부 세그먼트가 지붕면의 법선벡터와 이루는 방향각에 따라 수평 또는 수직의 가상 벽면을 생성하고 각각을 조정하였기 때문이다. 법선벡터와 수직 방향이 아닌 외부 세그먼트에 대해서는 수직 가상 벽면을 생성하고 이들을  $xy$ 방향으로 조정함으로써 실제로 붙어있는 벽면들이 B와 같이 올바르게 표현될 수 있었다.

그러나 본 연구에서는 건물을 여러 개의 평면으로 구성된 다면체 모델로 가정했기 때문에 C와 같이 곡면이 2개 이상의 평면으로 표현되는 한계가 있었다. E는 건물 모델에서 누락된 지붕면을 나타내는데, 이는 건물 추출 과정에서 추출되지 못하거나 원시 데이터의 점밀도에 비하여 지붕면의 크기가 매우 작아서 지붕면 분할 과정에서 제거되었기 때문이다.



(a)



(b)

그림 8. 3차원 건물 모델링 결과; (a)지역 I, (b)지역 II

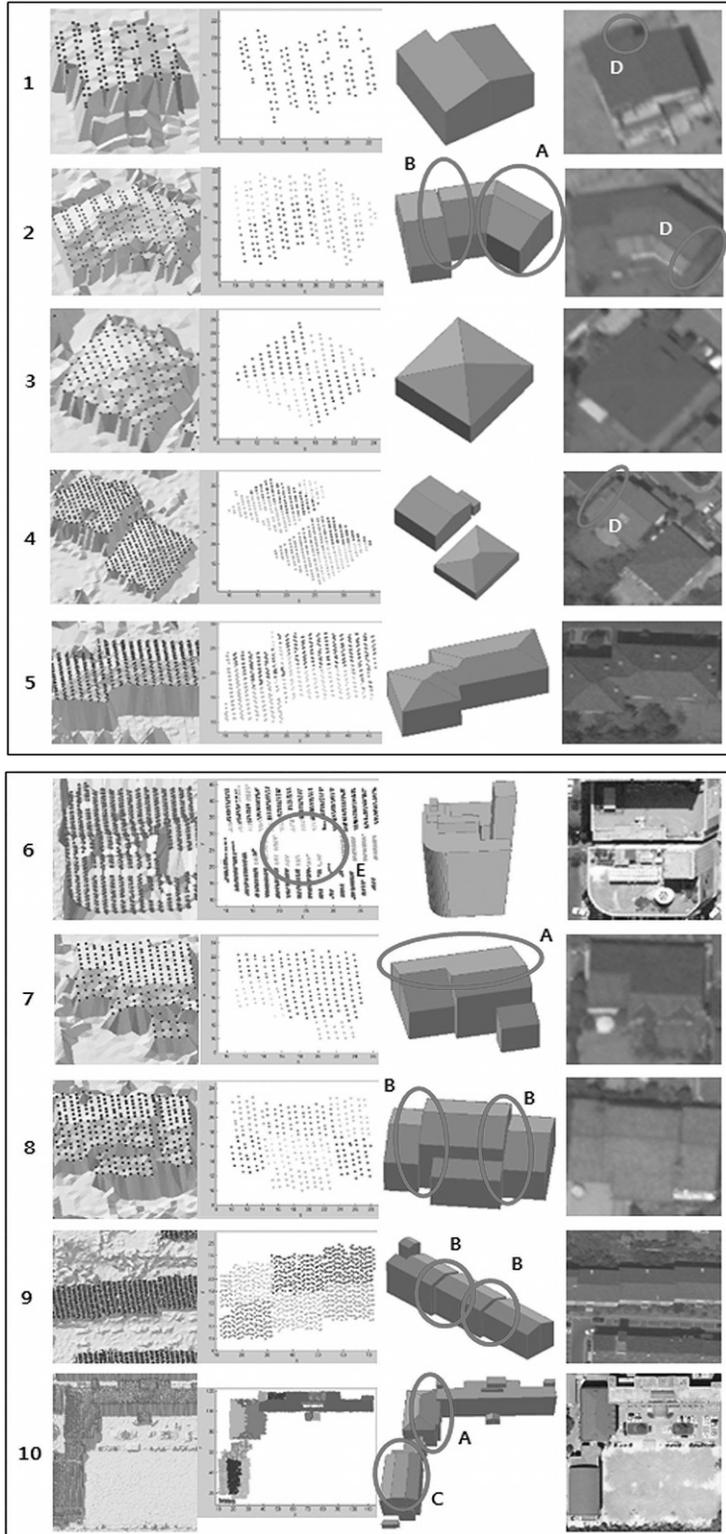


그림 9. 3차원 모델링(라이다 포인트, 분할된 지붕면, 3차원 건물모델, 항공사진)

### 4.3 정량적 비교 평가

3차원 건물 모델에 대한 정량적 평가 방법은 여러 가지가 있다. 김형태(2001)와 조홍범 등(2008)은 일부 건물의 모서리점 좌표의 위치정확도를 계산하였고, Dominger 등(2008)은 지붕 마루높이의 위치정확도를 계산하였다. Kim 등(2008)은 주로 평탄한 지붕면을 갖는 건물에 대하여 추출된 세그먼트의 완전성과 정확성을 사용하였다. Sampath 등(2010)과 유은진 등(2012)은 원시 데이터 포인트와 모델 평면간의 오차를 계산하였다. 3차원 모델을 평가하기 위해서는 이와 같은 평가 척도를 모두 적용하는 것이 맞지만 현실적으로 쉽지 않다.

본 연구에서는 앞서 분석한 10개의 건물에 대하여 올바르게 재구성된 면의 개수와 선의 개수를 바탕으로 완전성과 정확성을 계산하였고, 그 결과는 표 2와 같다. 항공라이다에서 추출한 건물 중 평가에 사용하지 않은 건물들을 이용하여 항공사진의 외부표정요소를 갱신한 후, 스테레오 항공사진에서 모서리점을 수동으로 추출하고 공간교선을 통해 참조자료를 생성하였다. 참조자료와 비교하여 대응되는 면의 면적이 약 70%이상 상호중복되면 면이 올바르게 재구성된 것으로 판단하였고, 대응되는 선의 길이가 70%이상 상호중복되면 선이 올바르게 재구성된 것으로 판단하였다. 면의 완전성과 정확성은 각각 86.1%, 93.9%였고 선의 완전성과 정확성은 각각 89.4%, 90.4%였다.

면이 추출되지 않은 경우는 주로 건물 추출 과정에서 추출되지 못하거나 원시 데이터의 점밀도에 비하여 크기가 매우 작은 지붕면이나 지붕위의 작은 구조물이 지붕면 클러스터링 과정에서 제거되어 발생하였다(그림 8의 D 및 E). 또한 곡면이 두 개 이상의 평면으로 재구성됨으로써 면의 재구성 정확도가 감소하였다. 선이 재구성되지 않은 것은 주로 면이 누락되어서 발생하였고 선이 잘못 추출된 경우는 곡면이 여러 개의 평면으로 표현되어서 발생하였다.

표 2. 3차원 건물 모델링 정확도(단위: %)

건물	정규성 고려		정규성 고려 안함	
	면	선	면	선
완전성	86.1	89.4	86.1	86.6
정확성	93.9	90.4	93.9	87.3

정규화를 적용한 결과의 정확도와 정규성을 고려하지 않은 방법에 의한 결과의 정확도를 비교해보면, 면의 정

확도는 재구성보다는 지붕면 분할에 크게 영향을 받기 때문에 두 방법에 의한 면의 완전성과 정확성은 같았다. 그러나 두 방법에 의한 선의 정확도는 정규성을 고려한 결과에서 완전성과 정확성이 각각 약 3% 향상되었다. 이는 본 연구의 방법이 각 지붕면의 외부 세그먼트 방향을 제한한 후 가상의 벽면을 생성하고 조정함으로써 건물 모델의 선 세그먼트를 보다 정확하게 재구성하였기 때문이다.

정규화를 적용한 방법에 의한 3차원 건물 재구성 결과에서 올바르게 재구성된 선의 개수에 대한 정확도가 향상된 것을 보다 자세히 분석하기 위하여 재구성된 건물 지붕 모서리점의 3차원 좌표를 참조자료와 비교하였다. 시각적 분석에 사용한 10개 건물 중 2, 3, 5, 7, 9번 등 5개 건물의 74개 점의 좌표값으로부터 각 건물과 전체 건물의 평균오차를 계산하였고, 그림 10은 그 결과를 나타낸다.

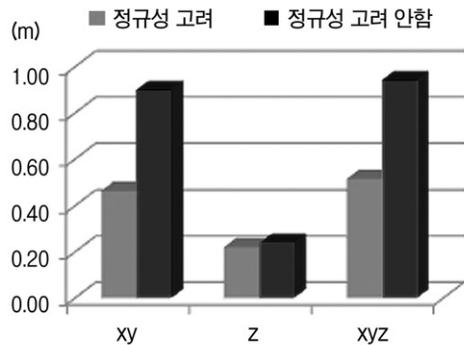


그림 10. 3차원 건물 모델링 정확도 비교

3차원 좌표에 대한 평균오차를 비교해보면, 정규성을 고려함으로써 수평위치 정확도가 약 0.4m 향상되었다. 정규성을 고려하지 않더라도 수직위치 오차는 0.24m로 비교적 양호하였는데, 이는 항공라이다 원시 데이터의 수직위치 정확도가 수평위치 정확도보다 높고, 실험에 사용한 건물들의 지붕면 경사도가 20° 내외로 비교적 작기 때문인 것으로 판단된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 건물모델 정규화를 통해 항공라이다 데이터로부터 다양한 형태의 3차원 건물을 모델링하였다. 점-선-면의 순차적인 조정을 통해 3차원 건물을 재구성함으로써 건물모델 구성요소 간의 평행성, 대칭성, 일치성 등을 충족시킬 수 있었다. 특히, 지붕면들의 방향이 서로 수직이 아니거나 지붕 처마 높이가 동일하지 않은 건물을

비슷한 다양한 건물의 정규화가 가능하였다. 정량적 분석을 통해 정규성을 고려함으로써 건물모델 '선'의 완전성과 정확성이 각각 약 3% 향상되는 것을 확인하였다. 또한 정규화를 통해 '점'의 위치정확도가 향상되었으며, 특히 수평 위치정확도가 약 0.4m 향상되는 것을 확인하였다. 그러나 점밀도에 비하여 작은 면적의 면들이 누락되는 오류는 정규화를 통해 해결할 수 없는 한계가 있었다. 향후에는 작은 면적의 면을 포함하는 건물에 대하여 지붕면 분할을 향상시키기 위한 연구가 수행되어야 할 것이다.

### 감사의 글

본 논문은 국방광역감시 특화연구센터 프로그램의 일환으로 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었습니다.

### 참고문헌

유은진, 윤성구, 이동천 (2012), 점군집 데이터에 의한 3차원 객체도와의 자동화와 정확도, 한국측량학회지, 한국측량학회, 제30권, 제1호, pp. 1-10.

이영진, 오재홍, 신성웅, 조우석 (2008), LiDAR 데이터의 3D Hough 변환을 이용한 지붕 평면의 세그멘테이션 및 정밀 평면방정식 추출, 한국측량학회지, 한국측량학회, 제 26권, 제 5호, pp. 505-512.

임새봄, 김정현, 이동천 (2009), 항공 라이다 데이터를 이용한 건물 모델링의 자동화, 한국측량학회지, 한국측량학회, 제 27권, 제 5호, pp. 649-628.

조홍범, 조우석, 박준구, 송낙현 (2008), 항공 LiDAR 데이터를 이용한 3차원 건물 모델링, *Korean Journal of Remote Sensing*, 대한원격탐사학회, Vol. 24, No. 2, pp. 141-152.

Alharthy, A. and Bethel, J. (2004), Detailed Building Reconstruction from Airborne Laser Scanning Data Using a Moving Surface Method, *XXth ISPRS Congress*, ISPRS, Istanbul, Turkey, unpagged CD-ROM.

Bezdek, J. C., Robert. E., and William. F. (1984), FCM: The Fuzzy C-means Clustering Algorithm, *Computers and Geosciences, Elsevier*, Vol. 10, Issues 2-3, pp. 191-203.

Chui, S. (1994), Fuzzy Model Identification Based on Cluster Estimation, *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, IOS Press, Vol. 2, No. 3, pp. 267-278.

Dorninger, P. and Pfeifer, N. (2008), A Comprehensive Automated 3D Approach for Building Extraction, Reconstruction, and Regularization from Airborne Laser Scanning Point Clouds, *Sensors*, MDPI AG, Vol. 8, pp. 7323-7343.

Filin, S. and Pfeifer, N. (2006), Segmentation of Airborne Data Using a Slope Adaptive Filter, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, ISPRS, Vol. 60, pp. 71-80.

Haala, N., Brenner, C., and Anders, K. (1998), 3D Urban GIS from Laser Altimeter and 2D Map Data. *IAPRS*, ISPRS, Vol. 32, Part. 3/1, Ohio, pp. 321-330.

Kim, C., Habib, A., and Chang, Y. (2008), Automatic generation of digital building models for complex structures from LiDAR data, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, ASPRS, Vol. 37, No. B4, pp. 456-462.

Kim, K. and Shan, J. (2011), Building Roof Modeling from Airborne Laser Scanning Data Based on Level Set Approach, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, ISPRS, Vol. 66, pp. 484-497.

Lee, I., and Shenk, T. (2001), 3D Perceptual Organization of Laser Altimetry Data, *IAPRS*, ISPRS, Vol. 34, pp. 57-65.

Lin, B. C., You, R., and Hsu, M. (2010), Building Model Reconstruction with Lidar Data and Topographic Map by Registration of Building Outlines, *ISPRS TC VII Symposium*, ISPRS, Vienna, Austria, Vol. 34, Part. 7B, pp. 371-375.

Mass, H. and Vosselman, G. (1999), Two Algorithms for Extracting Building Models from Raw Laser Altimetry Data, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, ISPRS, Vol. 54, No. 2/3, pp. 153-163.

Rottensteiner, F., (2003), Automatic generation of high-quality building models from Lidar data, *IEEE CG&A*, IEEE, Vol. 23, No. 6, pp. 42-51.

Rottensteiner, F., Trinder, J., Clode, S., and Kubik, K. (2005), Automated Delineation of Roof Planes from Lidar Data, *ISPRS WG III/3, III/4, V/3 Workshop "Laser scanning 2005"*, ISPRS, Enschede, the Netherlands, pp. 221-226.

Sampath, A., and Shan, J. (2010), Segmentation and Reconstruction of Polyhedral Building Roofs From Aerial Lidar Point Clouds, *IEEE Transaction on Geoscience and Remote sensing*, IEEE, Vol. 48, No. 3, pp. 1554-1567.

Verma, V., Kumar, R., and Hsu, S. (2006), 3D Building

- Detection and Modeling from Aerial LiDAR Data. *CPVR* 06, IEEE, Washington, DC., pp. 2213-2220.
- Vosselman, G. (1999), Building Reconstruction Using Planar faces in very high density height data, *IAPRS*, ISPRS, Vol. 32, Part. 2, pp. 87-92
- Vosselman, G. and Dijkman, S. (2001), 3D building model reconstruction from point clouds and ground plans, *IAPRS*, ISPRS, Vol. 34, Part. 3/4, pp. 22-24.
- Weidner, U., and Förstner, W. (1995), Towards Automatic Building Extraction from High-Resolution Digital Elevation Models, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, ISPRS, Vol. 50, pp. 38-49.

---

(접수일 2012. 06. 18, 심사일 2012. 07. 02, 심사완료일 2012. 07. 17)