

# LiDAR 데이터를 이용한 옥트리 분할 기반의 지붕요소 자동추출

## Automatic Extraction of Roof Components from LiDAR Data Based on Octree Segmentation

송낙현<sup>1)</sup> · 신성웅<sup>2)</sup> · 조홍범<sup>3)</sup> · 조우석<sup>4)</sup>

Song, Nak Hyeon · Shin, Sung Woong · Cho, Hong Beom · Cho, Woo Sug

### Abstract

The 3D building modeling is one of crucial components in building 3D geospatial information. The existing methods for 3D building modeling depend mainly on manual photogrammetric processes by stereoplotter compiler, which indeed take great amount of time and efforts. In addition, some automatic methods that were proposed in research papers and experimental trials have limitations of describing the details of buildings with lack of geometric accuracy. It is essential in automatic fashion that the boundary and shape of buildings should be drawn effortlessly by a sophisticated algorithm. In recent years, airborne LiDAR data representing earth surface in 3D has been utilized in many different fields. However, it is still in technical difficulties for clean and correct boundary extraction without human intervention. The usage of airborne LiDAR data will be much feasible to reconstruct the roof tops of buildings whose boundary lines could be taken out from existing digital maps. The paper proposed a method to reconstruct the roof tops of buildings using airborne LiDAR data with building boundary lines from digital map. The primary process is to perform octree-based segmentation to airborne LiDAR data recursively in 3D space till there are no more airborne LiDAR points to be segmented. Once the octree-based segmentation has been completed, each segmented patch is thereafter merged based on geometric spatial characteristics. The experimental results showed that the proposed method were capable of extracting various building roof components such as plane, gable, polyhedric and curved surface.

Keywords : LiDAR, Roof Components, Octree Segmentation, Merging, Plane Fitting

### 초 록

건물의 3차원 모델링은 3차원 공간정보를 구축하는데 있어서 매우 중요한 요소이다. 기존의 3차원 건물 모델링은 대부분 입체 항공사진을 이용하여 도화사에 의해 수동으로 진행되어 많은 시간과 비용이 소요된다. 또한 연구논문이나 실험적으로 시도되고 있는 일부 자동화 방법은 건물을 정확하고 세밀하게 묘사하는데 한계가 있다. 건물의 3차원 모델링을 자동화하기 위해서는 건물 외곽선과 지붕 모양을 정확하게 추정할 수 있는 알고리즘이 필수적이다. 최근 다양한 분야에서 활용되고 있는 항공라이다(LiDAR) 데이터는 지형지물에 대한 3차원 정보를 제공하지만, 이를 이용하여 건물 외곽선을 정확하게 추정하기에는 기술적으로 어려움이 있다. 따라서 기존에 구축된 수치지도의 건물 외곽선을 이용한다면, 항공라이다 데이터를 이용하여 3차원 평면을 최소단위로 하는 건물지붕의 구성요소들을 조합하여 자동으로 건물지붕의 3차원 모델링이 가능하다. 본 논문은 기 구축된 수치지도의 건물 외곽선과 옥트리(octree) 분할을 기반으로 항공라이다 데이터를 이용하여 건물지붕의 구성요소를 자동으로 추출하는 방법을 제안하였다. 건물지붕에 대한 항공라이다 데이터를 3차원 공간상에서 재귀적으로 분할하여 패치(patch)를 구성하고, 동일한 속성을 갖는 패치들을 병합하여 지붕의 구성요소를 추출한다. 항공라이다 데이터를 이용하여 제안된 방법으로 실험한 결과, 평면, 계이بل, 다면, 곡면 등 다양한 형태의 지붕에 대한 구성요소들을 자동으로 추출 할 수 있었다.

핵심어 : 라이다, 지붕요소, 옥트리 분할, 병합, 평면근사

1) 정희원 · 인하대학교 대학원 지리정보공학과 박사과정(E-mail:msong@inhaian.net)

2) 연결저자 · 정희원 · 한국전자통신연구원 텔레메틱스 · USN연구단 공간정보연구팀 선임연구원(E-mail:sshin@etri.re.kr)

3) 인하대학교 대학원 지리정보공학과 석사과정(E-mail:ChoHB@inhaian.net)

4) 정희원 · 인하대학교 토목공학과 부교수(E-mail:wcho@inha.ac.kr)

# 1. 서 론

## 1.1 연구 배경 및 목적

지식정보화 사회로의 변화와 함께 지형공간정보는 광범위하고 다양한 분야에서 활용되고 있으며, 최근에는 현실세계를 그대로 재현한 3차원 지형공간정보에 대한 수요가 증가하고 있다. 특히 현대사회에서 인간의 거주환경이 도시를 중심으로 발전하고 있는 현실과 맞물려 최근에는 u-City 등과 같이 도시지역에 대한 3차원 지형공간정보의 구축을 현실화하기 위한 논의와 연구가 활발히 진행되고 있다.

도시지역의 3차원 지형공간정보를 구축하는데 있어서 건물의 3차원 모델링은 매우 중요한 핵심요소이다. 그러나 아직까지 건물의 3차원 모델링을 위한 기술개발은 매우 미흡한 실정이다. 도화사에 의해 수동으로 진행되는 3차원 도화방법은 많은 시간과 비용이 소요되며, 현재까지 제시된 자동화 방법들은 건물을 정확하고 세밀하게 묘사하는데 한계가 있다. 이러한 한계를 극복하기 위한 방안으로 최근에는 LiDAR 데이터를 이용한 모델링 방법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 2차원으로 획득되는 영상에 비해 LiDAR 데이터는 3차원 점집합으로 획득되기 때문에 정확한 높이정보를 이용할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

LiDAR 점 데이터를 이용하여 건물을 모델링하기 위하여 다양한 방법들이 시도되었다. Lee와 Schenk(2001)는 3차원 인지구조(perceptual organization)과정을 통해 불규칙한 LiDAR 점 데이터를 분할(segmentation)하여 패치(patch)를 생성하고, 동일 속성의 패치들을 병합한 표면(surface)을 구성하여 다면구조물(polyhedral structure)을 추출하는 방법을 제시하였다. Alharthy와 Bethel(2004)은 표면의 경사변화를 계산하는 마스크를 적용하여 건물의 지붕면을 찾아내는 방법을 제시하였지만 LiDAR 점 데이터의 보간(interpolation)을 통하여 픽셀(pixe) 구조로 변환하여 보간 과정에서 오차가 발생하는 등의 한계가 존재한다. Schwalbe(2004)는 LiDAR 점 데이터를 일정한 면에 투영하여 개략적인 지붕의 형상을 추정한 다음 이를 기반으로 세밀하게 건물을 모델링하는 방법을 연구하였으며, 김홍식(2005)은 2차원의 사분트리 분할(quadtree segmentation) 기법을 적용하여 LiDAR 데이터로부터 지붕을 3차원으로 모델링하는 방법을 제시하였다. 그러나 Schwalbe(2004)와 김홍식(2005)은 각각 수학적인 매개변수와 지붕의 형태에 따라서 지붕의 모양을 제약 하는 문

제점을 갖고 있다. Wang과 Tseng(2004, 2005)은 옥트리(octree) 구조를 기반으로 LiDAR 점 데이터를 분리하고, 분리된 점 데이터를 동일한 평면을 구성하는 점들로 병합하여 지형·지물을 분할·분류하는 방법을 제시하였다. 그러나 Wang과 Tseng(2005, 2005)는 건물을 모델링 하는 것이 아닌 지형·지물을 분류하기 위하여 옥트리 분할을 적용하였다. 이 외에도 다양한 연구가 이루어졌으며, 항공사진 및 수치지도 등의 자료를 LiDAR 데이터와 융합(fusion)하여 모델링하는 방법 등도 제시되고 있다. 본 연구는 기존 건물 모델링 기법에서 사용되었던 지붕의 제약 및 점 데이터의 픽셀 구조로의 변환 등의 방법을 배제하고, 수치지도와 LiDAR 점 데이터를 융합하여 건물의 지붕요소에 대한 자동추출 방법을 제시하였다.

지붕의 모양은 평면, 게이블, 다면(polyhedral), 곡면 등 매우 다양하지만 이들을 높이, 경사, 방향 등 동일한 속성을 갖는 영역으로 분할해 보면 모든 지붕은 3차원 평면의 조합으로 구성되어 있다는 것을 알 수 있다. 특히 곡면의 경우에는 컴퓨터상에서 곡면을 디스플레이하는 원리와 같이 연속된 평면의 조합으로 묘사할 수 있다. 이러한 전제하에 본 논문에서는 옥트리 분할(octree segmentation) 기법을 기반으로 LiDAR 점 데이터로부터 3차원 평면으로 정의된 지붕요소를 자동으로 추출하는 방법을 제안하였다. 지붕요소의 추출과정은 동일한 속성의 최소단위 점 집합으로 분할된 패치를 생성하는 분할과정과 분할된 패치를 병합하여 3차원 평면으로 정의된 지붕요소를 추출하는 병합과정으로 진행된다.

## 1.2 연구방법

3차원 공간상에 불규칙하게 분포되어있는 LiDAR 데이터를 처리하기 위해서는 LiDAR 데이터의 특성에 맞는 처리방법이 적용되어야 한다. 본 연구에서는 Lee와 Schenk(2001)가 제시한 3차원 인지구조를 바탕으로 LiDAR 데이터를 점, 패치, 표면으로 생성하고 처리하였다.

LiDAR 데이터는 불규칙한 3차원 점 형식으로 기록되어있는데 이러한 3차원 공간상의 점들을 동일한 특성을 가지는 최소단위인 패치로 구성하기 위하여 분할과정이 수행된다. 본 연구에서는 3차원으로 공간을 분할하는 옥트리 분할(octree segmentation)을 기본으로 건물 주방향의 추출, 적합한 제약조건의 적용 과정을 통하여 3차원 점들을 패치로 구성한다. 분할과정을 통하여 구성되어진 패치를 이용하여 패치들 간의 공간적 특성을 추출하고 동일한 공간적 특성을 지니고 있는 패치들을 군집하면 평면

이 구성된다. 본 연구에서는 분할과정에서 획득되어진 패치들을 이용하여 최적합 평면의 추출, 인접성 비교, 법선 벡터의 비교 과정을 통하여 패치들 간의 공간적 특성을 비교하고 군집한다. 다음의 그림 1은 본 연구에서 수행하고 있는 전체적인 연구 방법에 관하여 설명하고 있다.

## 2. 분할과정

### 2.1 옥트리 분할(Octree Segmentation)

옥트리 분할은 3차원 공간을 표현하기 위한 옥트리 자료구조를 기반으로 대상공간을 연속적으로 계층화하고 그룹화하여 분할하는 재귀적인 3차원 공간분할방법이다. 즉, 그림 2와 같이 육면체로 정의된 3차원 대상공간을 X, Y, Z축 방향으로 각각 이등분하여 한번에 8개의 육면체 공간으로 분할하는 과정을 연속적으로 수행함으로써 공간을 세분화하는 방법이다. 옥트리 분할과정에서 생성된 8개의 육면체공간들은 그림 3과 같이 8개의 노드(node)로 분할되는 자료구조(data structure)로 설명할 수 있다.

본 논문에서 옥트리 분할기법은 건물을 구성하고 있는 불규칙한 LiDAR 점 데이터를 높이, 경사, 방향 등 동일한 속성을 갖는 점집합으로 분할하여 패치를 생성하기 위

한 방안으로 적용되었다. 패치란 동일한 속성을 갖는 점 집합으로 분할된 최소단위의 표면요소를 의미한다(Lee and Schenk, 2001).

분할과정은 다음과 같이 4개의 제약조건을 동시에 만족하는 경우에 대해서 재귀적으로 진행하였다.

- 육면체의 X-Y면적: 다음단계에 분할될 각 육면체의 X-Y평면상의 면적이 분할될 각 육면체의 점의 개수로 계산된 최소면적보다 작을 경우 분할을 중단한다. 최소면적은 데이터마다 상대적으로 가지는 특징인 점 밀도를 이용하여 계산되어지며 점밀도란 1m<sup>2</sup>당 존재하는 점의 수를 의미한다. 점을 이용하여 면을 구성하기 위해서는 최소 3점을 필요로 하며 본 연구에서는 최소 5점을 포함하는 면적을 최소면적으로 제안하였으며 최소면적을 가지는 정사각형의 한 변의 길이를 최소거리로 제안하였다. 최소거리는 분할과정 및 병합과정에서 점집합의 연속성을 판단할 때 임계값으로서 활용된다.
- 평면근사의 평균제곱근오차(RMSE): 다음단계에 분할될 각 육면체의 점들을 통해 평면방정식을 추정하고, 추정된 평면과 점들간의 거리에 대한 평균제곱근오차가

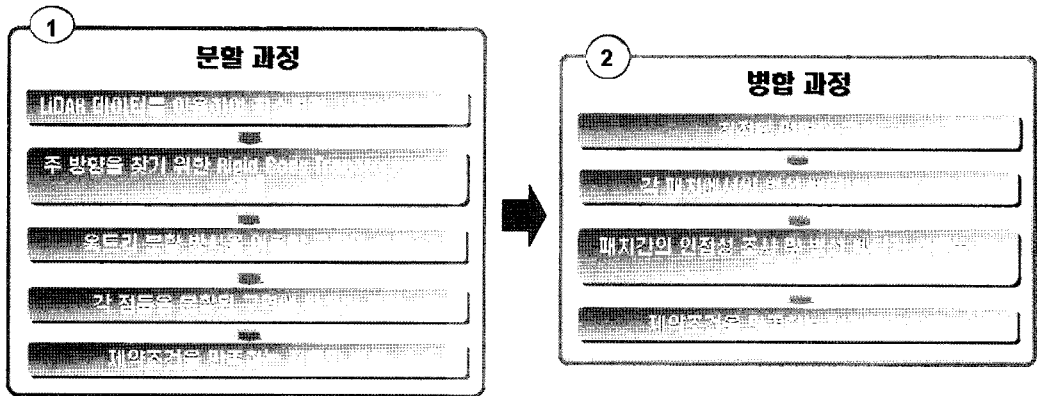


그림 1. 연구의 흐름도

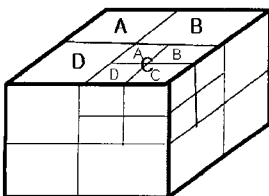


그림 2. 옥트리 분할

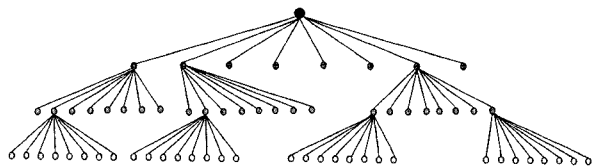
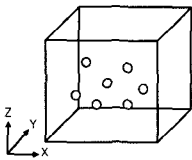


그림 3. 옥트리 자료구조

임계값 보다 작을 경우 분할을 중단한다. 본 연구에서는 임계 평균제곱근오차를 30cm로 설정하였다.

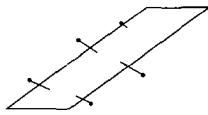
- 점의 개수: 평면근사(plane fitting)를 위해서 다음단계에 분할될 각 육면체의 점의 개수가 5점 이하일 경우 분할을 중단한다.
- 점집합의 연속성: 다음단계에 분할될 각 육면체의 점들을 그룹핑(grouping)하여 하나의 육면체에 2개 이상의 점집합이 존재할 경우 분할을 계속한다. 패치의 점집합의 수를 확인하기 위하여 점집합 사이의 최소거리를 사용한다. 본 연구에서는 점집합 사이의 최소거리를 위에서 언급하였듯이 점밀도를 이용한 최소거리를 이용하여 데이터마다 상대적인 값을 지니도록 설정하였다.

육면체의 X-Y면적



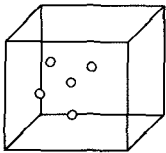
X-Y평면의 최소면적 =  $\frac{\text{점의 개수}}{\text{점밀도}}$

평면근사의 RMSE



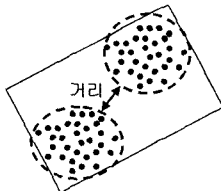
$$RMSE = \sqrt{\frac{\text{평면과 점간의거리의합}}{\text{점의개수}}}$$

점의 개수



육면체 내에 점의 수가 5개 이하이면 분할 중단

점집합의 연속성



육면체 내에 2개 이상의 점집합이 존재하면 분할 진행

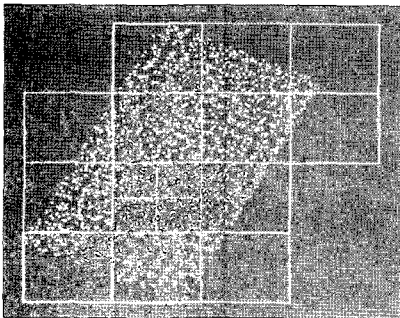
그림 4. 분할과정의 제약조건

## 2.2 건물의 주방향 설정

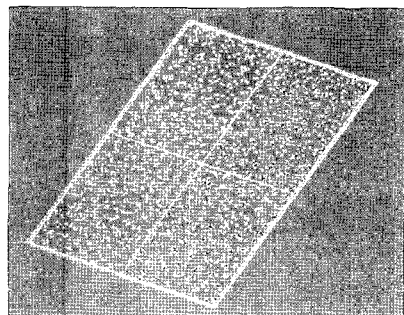
실세계에 존재하는 대부분의 건물들은 직각좌표계로 정의된 LiDAR 점 데이터의 X, Y좌표축과 평행하지 않기 때문에 정의된 좌표계상에서 분할을 수행할 경우 효율성과 정확성을 확보하기 어렵다. 따라서 분할 이전에 건물의 주방향을 고려한 새로운 X-Y좌표계를 설정하는 과정이 필요하다. 그림 5는 게이블형태의 지붕에 대해 건물의 주방향을 고려하지 않은 분할과 주방향을 고려한 분할을 비교한 것이다. 주방향을 고려하지 않은 분할의 경우에는 지붕의 능선부분에서 분할횟수가 증가하여 처리시간이 지연되고 분할결과도 예측하기 어렵다. 반면에 주방향을 고려할 경우에는 능선부분에서 발생하는 불필요한 분할과정이 감소하여 처리시간과 분할 정확도를 향상시킬 수 있다.

본 논문에서는 건물의 주방향을 설정하기 위해서 다음과 같은 방법을 적용하였다.

- Convex Hull의 구성: 건물을 구성하는 모든 LiDAR 점 데이터를 이용하여 그림 6의 (a)와 같이 X-Y평면 상에서 Convex Hull을 구성한다.
- 최소면적사각형 결정: 그림 6의 (b)와 같이 Rotating Caliper를 이용하여 최소면적사각형을 결정한다. Rotating Caliper란 Convex Hull을 구성하는 임의의 변과 반대 방향에서 Convex Hull의 꼭지점 또는 변과 접하는 평행한 변으로 사각형을 구성하는 알고리즘이다. Convex Hull의 꼭지점 또는 변과 접하는 평행한 변과 Convex Hull의 변을 비교하여 각도가 작은 변을 기준으로 앞에서와 같은 방법으로 모든 변에 적용하여 사각형을 구성하고 최소면적을 가지는 사각형을 최소면적사각형으로 결정한다.

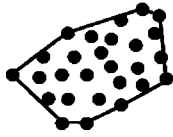


(a) 주방향을 고려하지 않은 경우

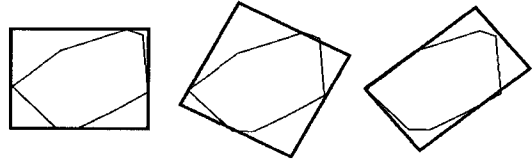


(b) 주방향을 고려한 경우

그림 5. 건물의 주방향을 고려한 게이블지붕의 분할 예



(a) Convex Hull 구성



(b) Rotating Caliper를 이용한 최소면적사각형 결정

그림 6. 건물의 주방향 설정과정

- 좌표변환계수 결정: 최소면적사각형의 4개 모서리 점을 이용하여 X-Y평면에 대한 2차원 좌표변환계수를 결정함으로써 건물의 주방향과 주방향에 따른 새로운 모델 좌표계를 설정한다.

### 3. 병합과정

#### 3.1 평면근사(Plane Fitting)

분할과 병합과정에서 요구되는 평면방정식을 추정하기 위해서 본 연구에서는 Boggs(1987)에 의해 제안된 ODR (Orthogonal Distance Regression) 알고리즘을 적용하였다. ODR 알고리즘은 입력된 점과 추정된 평면사이의 거리에 대한 평균제곱근오차를 임계값과 비교하여 평면방정식을 결정하는 방법이다.

$$ax + by + cz + d = 0 \quad (1)$$

3차원 직각좌표계로 정의된 평면방정식은 식 (1)과 같으며, 식 (1)을 통하여 정의된 평면과 임의의 점  $(x_i, y_i, z_i)$  사이의 거리는 식 (2)와 같다.

$$D_i = \frac{|ax_i + by_i + cz_i + d|}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \quad (2)$$

평면으로 근사되는 모든 점과 그 점들로부터 근사되어진 평면과의 거리제곱의 합은 식 (1)에 나타나는 평면방정식을 구성하는 계수  $a, b, c, d$ 와 임의의 점  $(x_i, y_i, z_i)$ 를 이용하여 식 (3)과 같이 표현된다.

$$f(a, b, c, d) = \sum \frac{(ax_i + by_i + cz_i + d)^2}{a^2 + b^2 + c^2} \quad (3)$$

$f(a, b, c, d)$ 가 최소가 되기 위해서는 일차편미분식이 0이 되어야 하며, 평면으로 근사되는 모든 점들로부터 획득한 무게중심점이 근사된 평면위에 존재해야 한다. 식 (1)에 무게중심점  $(x_c, y_c, z_c)$ 을 대입하여 식 (4)를 구성한다.

$$d = -(ax_c + by_c + cz_c) \quad (4)$$

여기서  $a, b, c, d$ 는 식 (1)에 표현된 평면방정식의 계수이다. 위 식에 따라 식 (1)의 평면방정식을 다시 정리하면 식 (5)와 같다.

$$a(x - x_c) + b(y - y_c) + c(z - z_c) = 0 \quad (5)$$

근사되어진 평면과 평면으로 근사되는 모든 점들의 거리 제곱 합을 나타낸 식 (3)을 위의 식 (5)을 이용하여 정리하면 식 (6)과 같다.

$$f(a, b, c) = \sum \frac{[a(x - x_i) + b(y - y_i) + c(z - z_i)]^2}{a^2 + b^2 + c^2} \quad (6)$$

식 (6)을 매트릭스 형태로 정리하면 식 (7)과 같으며 각각의 항목인  $V^T$  및  $M$  매트릭스는 다음의 식 (8)과 같이 구성할 수 있다.

$$f(a, b, c) = f(V) = \frac{(V^T M^T)(MV)}{V^T V} \quad (7)$$

$$V^T = [abc], M = \begin{bmatrix} x_1 - x_c & y_1 - y_c & z_1 - z_c \\ x_2 - x_c & y_2 - y_c & z_2 - z_c \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n - x_c & y_n - y_c & z_n - z_c \end{bmatrix} \quad (8)$$

여기서,  $f(V)$ 를 Rayleigh Quotient라고 하며 모든 점에 대한 공분산(covariance) 매트릭스는 식 (9)와 같다.

$$M^T M = \begin{bmatrix} \sum_{i=0}^n (x_i - x_c)^2 & \sum_{i=0}^n (x_i - x_c)(y_i - y_c) & \sum_{i=0}^n (x_i - x_c)(z_i - z_c) \\ \sum_{i=0}^n (x_i - x_c)(y_i - y_c) & \sum_{i=0}^n (y_i - y_c)^2 & \sum_{i=0}^n (y_i - y_c)(z_i - z_c) \\ \sum_{i=0}^n (x_i - x_c)(z_i - z_c) & \sum_{i=0}^n (y_i - y_c)(z_i - z_c) & \sum_{i=0}^n (z_i - z_c)^2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$f(V)$ 는  $V$ 가 공분산 매트릭스  $M^T M$ 이 최소의 고유값(eigenvalue)를 갖는 고유벡터(eigenvector)로 설정될 때 최소가 되며, 이때 최소 고유값에 의해 결정된 고유벡터는 근사평면의 법선벡터가 된다. 법선벡터와 평면의 교점

$(x_c, y_c, z_c)$ 을 알면 평면방정식을 결정할 수 있다.

### 3.2 패치(Patch)의 병합

분할과정을 통해 생성된 각각의 패치는 LiDAR 점 데이터를 기반으로 분할된 공간적인 개념의 최소단위이므로 지붕을 구성하는 3차원 평면요소들을 추출하기 위해서는 동일한 속성을 갖는 패치들을 병합하는 과정이 필요하다. 패치를 병합하기 위해서는 패치들 간의 인접관계와 높이, 경사 등 공간적 특성이 고려되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 패치의 인접성, 점집합의 연속성, 법선벡터의 비교 등 3가지 제약조건을 순차적으로 적용하여 패치들을 병합하였다.

#### 3.2.1 패치의 인접성

평면방정식을 통해 결정된 법선벡터를 비교하여 패치들을 병합하기 위해서는 동일한 평면요소로 병합될 수 있는 공간적인 위치관계를 판단하는 과정이 선행되어야 한다. 본 연구에서 패치의 인접성이란 공간적인 인접성만을 뜻하는 것이 아니라 기본적으로 공간상에서 패치가 인접하여야 하며 그림 7의 (a)와 같이 패치의 점집합으로부터 획득되어진 평면이 연속적인 평면이라고 인정할 수 있는 패치를 인접한 패치, 공간적으로 패치가 인접하더라도 그림 7의 (b)와 같이 같은 평면이라고 인정할 수 없는 공간에 위치한 경우를 인접하지 않은 패치라고 정의한다. 이

와 같은 패치의 인접성은 패치의 공간적 범위를 나타내는 육면체의 좌표정보를 이용하여 판단한다. 또한 패치간의 병합이 수행될 수 있는 공간적인 위치관계는 인접한 패치의 크기가 동일한 경우와 동일하지 않은 경우에 따라서 다르게 판단될 수 있다. 패치의 크기가 동일한 경우에는 그림 7의 (b)와 같이 각 패치의 평면이 서로 인접할 수 없는 위치에 있는 패치들을 제외한 16개의 인접패치들을 비교하였다. 패치의 크기가 동일하지 않은 경우에는 그림 8과 같이 패치의 상·하면 또는 모서리 점에 접하는 패치들을 제외한 인접패치들을 비교하였다.

#### 3.2.2 점집합의 연속성

법선벡터를 비교하여 패치들을 병합하기 위한 또 하나의 선행조건으로 패치의 인접성을 만족하는 각 패치의 점집합들이 3차원 공간상에서 연속적으로 분포되어 있는지를 비교하였다. 즉, 각각의 패치를 구성하고 있는 점집합 간의 거리가 임계거리 이내일 경우 평면근사를 통한 법선벡터의 비교대상 패치로 결정하였다. 임계거리는 분할과정의 제약과정에서 육면체의 X-Y면적에서 제한하였듯이 점밀도를 이용하여 계산하며 데이터마다 상대적인 값을 지니도록 설정하였다.

#### 3.2.3 법선벡터의 비교

패치의 인접성과 점집합의 연속성을 모두 만족하는 패

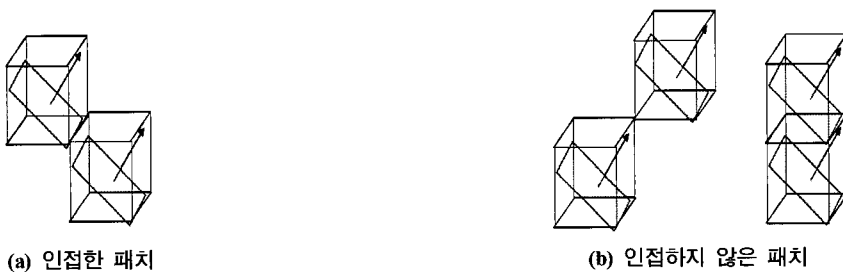


그림 7. 동일크기 패치의 인접성

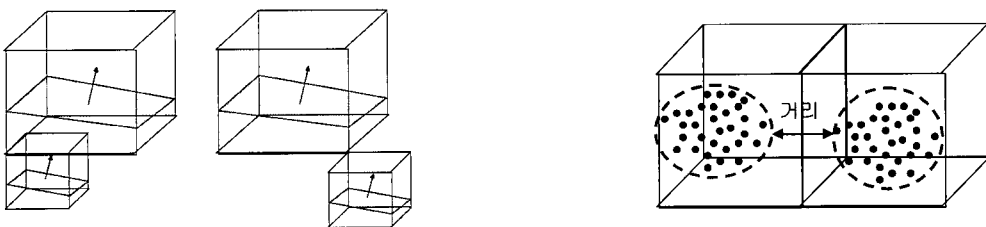


그림 8. 크기가 다른 패치의 인접성

그림 9. 점집합의 연속성

치들에 대해서 평면근사를 수행하고 그림 10과 같이 각 평면의 법선벡터가 이루는 각을 비교하여 병합여부를 결정하였다. 그림 10에서 점선은 수직오차( $\Delta v$ )를 포함하지 않는 이상적인 평면을 나타내며 실선은 각각  $L_1$ 과  $L_2$  길이를 가진 패치에서 실제 데이터를 이용하여 구성되었던 평면을 표현한다. 각각의 패치에서 구성되었던 평면의 법선벡터( $\vec{N}_1, \vec{N}_2$ )가 이루는 각( $a_n$ )은 이상적인 평면과 실제 데이터를 통하여 구성되었던 평면사이의 각( $a_1, a_2$ )의 합을 통하여 구하여진다. 병합여부를 결정하기 위한 법선벡터간의 임계각( $a_n$ )은 식 (10)을 통해 결정하였으며, 각 평면의 법선벡터가 이루는 각이 임계각 보다 작은 경우에 대해서 병합을 수행하였다.

식 (10)에서 확인할 수 있듯이 임계값을 결정하는데 영향을 미치는 변수는 수직오차이다. 허용하는 수직오차에 따라서 패치의 병합여부를 판별한다. 따라서 허용하는 수직오차의 범위에 따라서 결과에 많은 영향이 미치게 된다. 허용하는 수직오차를 엄격하게 적용하면 많은 평면이 생성되어 현실과 다른 지붕구성요소를 나타내게 되며, 수직오차를 크게 적용하면 적은 평면이 생성되어 역시 현실과 다른 지붕구성을 나타내게 된다.

$$a_n = a_1 + a_2 = \tan^{-1}\left(\frac{2\Delta v}{L_1}\right) + \tan^{-1}\left(\frac{2\Delta v}{L_2}\right) \quad (10)$$

$L_1, L_2$ : 옥면체의 길이,  $\Delta v$ : 수직오차

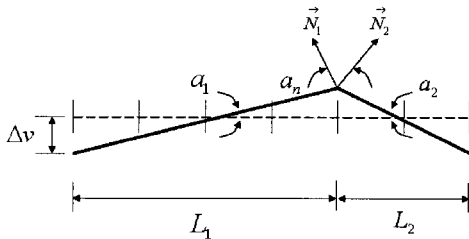


그림 10. 법선벡터의 비교

## 4. 실험결과

### 4.1 실험데이터

실험데이터는 표 1과 같이 캐나다 Optech사의 ALTM 30/70 항공 LiDAR 장비를 사용하여 1256.92m의 고도에서 3~4 points/m<sup>2</sup>의 점밀도로 촬영되었다. 실험대상지역은 대전시 서구 만년동 일대이며, 본 논문에서 제안한 지붕요소의 추출결과를 분석하기 위해서 대상지역내에서 단순평면의 조합, 게이블, 곡면, 다면 형태의 지붕으로 구성된 건물들을 추출하여 실험을 수행하였다.

### 4.2 실험결과

본 논문에서 제안한 지붕요소 추출방법을 분석하기 위한 초기단계의 실험으로 두 개의 경사면으로 구성된 단순 게이블 지붕에 대해 그림 10과 같이 각 단계별로 알고리즘을 적용하여 결과를 분석하였다. 그림 10의 (a)는 비교적 경사가 작은 두 개의 경사면으로 구성된 단순게이블 지붕에 대한 LiDAR 점 데이터이며, (b)는 옥트리 분할과정을 통해 분할된 4개의 패치를 공간단위로 표현한 것이다. (c)는 분할된 4개의 패치를 이용하여 동일한 속성을 갖는 두 개의 평면으로 병합한 결과를 나타낸 것이다. 병합의 결과로 추출된 2개의 지붕요소에 대한 평면방정식은 표 2와 같으며, 실험을 통해 비교적 작은 경사면으로 구성된 단순게이블 지붕의 두 개 평면을 효과적으로 추출하는 것을 확인할 수 있다. 추출된 지붕요소를 이용하여 지붕을 모델링하기 위해서는 수치지도 등과 같은 별도의 외곽선 정보가 필요하며, 지붕의 능선부분은 추출된 두 개 평면의 접선을 이용하여 추정할 수 있다.

표 1. 실험데이터의 제원

항목	제원
촬영장비	Optech ALTM 30/70
촬영고도	1256.92m
주사폭	414.77m
스캐닝 방식	Oscillating mirror
점밀도	3~4 points/m <sup>2</sup>

표 2. 단순게이블 지붕의 구성요소별 평면방정식 추정결과

지붕요소	평면방정식의 매개변수( $aX+bY+cZ+d=0$ )			
	a	b	c	d
경사면 1	-0.001288	0.000703	0.009892	-9043.302104
경사면 2	0.001254	-0.000681	0.009898	8604.602310

그림 11은 지면과 평행한 단순평면이 두 개의 층으로 구성되어 있는 아파트 건물의 지붕요소를 추출한 결과이다. 그림 11의 (a)는 5개의 옥탑구조물로 구성된 아파트 건물에 대한 CCD 영상과 LiDAR 점 데이터이며, (b)는 분할된 패치 공간을 X-Y평면과 X-Z평면으로 나누어 표현한 것이다. (c)는 병합과정을 통해 아파트 본 건물에 대한 1개의 지붕요소와 5개 옥탑건물의 지붕요소를 추출한 결과를 나타낸 것이다. 그림 11의 (c)에서 흰색으로 표현된 점들은 평면근사과정에서 과대오차를 발생시키는 점들을 나타낸 것으로, 이러한 점들은 근사된 평면의 특성을 왜곡시키는 중요한 요인이 되므로 병합과정에서 제외

하였다. 추출된 각 지붕요소의 평면방정식은 표 3과 같다.

그림 12는 곡면은 연속된 평면의 조합으로 묘사할 수 있다는 가정 하에, 대전시 엑스포공원내에 있는 곡면형태의 구조물에 대해 평면요소를 추출한 결과이다. 그림 12의 (a)는 곡면지붕에 대한 LiDAR 점 데이터이며, (b)는 분할과정을 통해 분할된 각 패치 공간을 표현한 것이다. (c)는 병합과정을 통해 추출된 5개의 연속된 평면요소들을 나타낸 것으로서, 경사변화가 작은 곳은 넓은 간격으로, 경사변화가 큰 곳은 좁은 간격으로 여러 개의 평면이 연속적으로 추출된 것을 확인할 수 있다.

그림 13은 여러 개의 경사면으로 구성된 다면구조물의

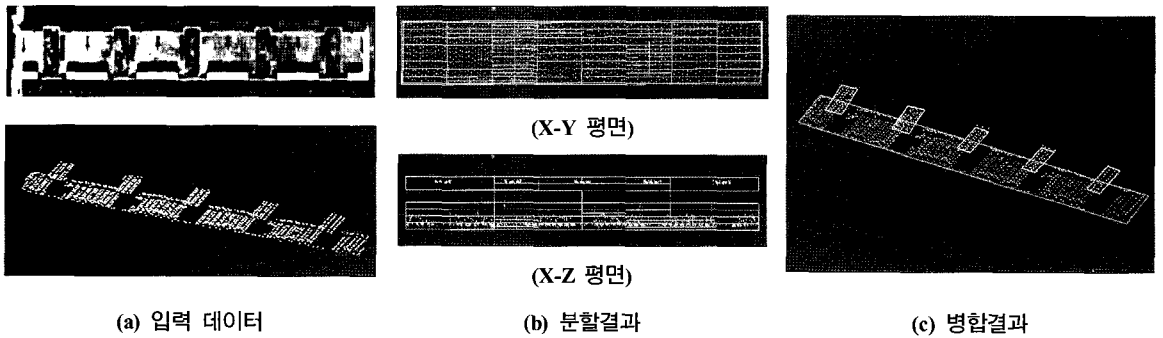


그림 11. 단순평면이 조합된 지붕의 평면요소 추출

표 3. 단순평면이 조합된 지붕의 구성요소별 평면방정식 추정결과

지붕요소	평면방정식의 매개변수( $aX+bY+cZ+d=0$ )			
	a	b	c	d
본 건물	0.000009	-0.000116	0.00999	3364.662847
옥탑 1	0.000246	0.000037	0.009997	-7031.740139
옥탑 2	0.000186	0.000046	0.009998	-5921.607689
옥탑 3	-0.000116	0.000034	0.009999	1519.083473
옥탑 4	-0.000057	0.000001	0.01	1172.218645
옥탑 5	-0.000072	-0.000039	0.01	2805.129682

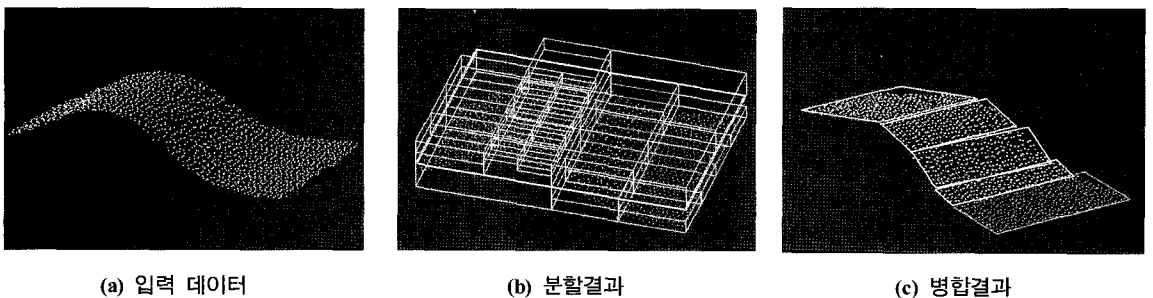
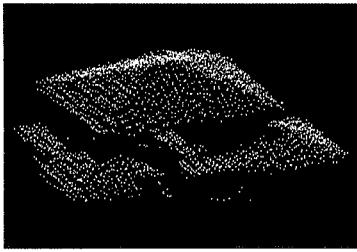
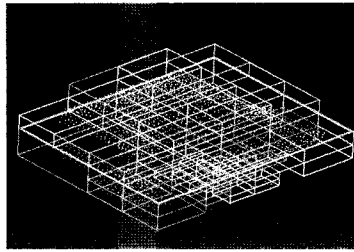


그림 12. 곡면지붕의 평면요소 추출

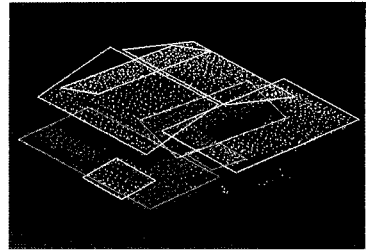




(a) 입력 데이터



(b) 분할결과



(c) 병합결과

그림 13. 다면지붕의 평면요소 추출

지붕요소를 추출한 결과이다. 그림 13의 (a)는 4개의 경사면으로 구성된 사각뿔형태의 지붕과 주변의 층이 다른 여러 평면으로 조합된 복잡다면구조물에 대한 LiDAR 점 데이터를 나타낸 것이다. (b)는 옥트리 분할과정을 통해 분할된 각 패치 공간을 표현한 것이며, (c)는 병합과정을 통해 사각뿔의 4개면과 주변에 위치한 층이 다른 4개의 평면요소를 추출한 결과를 나타낸 것이다. 사각뿔 형태의 경우 4개의 면이 추출된 것을 확인할 수 있으나, X-Y, X-Z, Y-Z 평면상에서 공간을 직각사각형 단위로 분할하기 때문에 사각뿔의 첨두부분에서 정확한 평면요소를 추출하는데 한계가 있다는 것을 확인할 수 있다. 따라서 본 논문의 성과를 바탕으로 보다 효과적으로 지붕을 모델링하기 위해서는 삼각형 등 지붕면의 형태와 경계부분의 방향성을 고려한 지붕요소 추출방법과 추출된 각 평면요소를 조합하여 지붕의 패턴을 추정하고 이를 기반으로 지붕을 모델링할 수 있는 추가적인 연구가 필요하다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 평면, 게이블, 다면, 곡면 등 모든 형태의 지붕은 3차원 평면을 기본단위로 하는 지붕요소들로 표현할 수 있다는 기본 전제하에, 옥트리 분할을 기반으로 LiDAR 데이터를 이용하여 건물의 지붕요소를 추출하는 방법을 제안하였다.

지붕요소의 추출과정은 동일한 속성의 최소단위 점집합으로 분할된 패치를 생성하는 분할과정과 분할된 패치를 병합하여 3차원 평면으로 정의된 지붕요소를 추출하는 병합과정으로 진행하였다. 분할과정에서는 옥트리 분할방법을 기반으로 처리시간과 분할 정확도를 높이기 위해서 건물의 주방향을 결정하고, 육면체의 X-Y면적, 평면근사의 평균제곱근오차, 점의 개수, 점집합의 연속성 등의 제약조건을 적용하여 패치를 생성하였다. 병합과정

에서는 패치의 인접성과 점집합의 연속성을 만족하는 패치들에 대해 평면방정식을 추정하고 법선벡터를 비교하여 병합함으로써, 3차원 평면으로 정의된 지붕요소들을 추출하였다.

제안된 방법은 3~4 points/m<sup>2</sup>의 점밀도로 획득된 LiDAR 데이터에 대해서 실험을 통해 검증하였으며, 실험결과 단순평면의 조합, 게이블, 곡면 등의 지붕에 대한 평면요소들을 효과적으로 추출할 수 있음을 확인할 수 있었다. 특히 곡면의 경우에는 제안된 방법을 통해 경사변화가 작은 곳은 넓은 간격으로, 경사변화가 큰 곳은 좁은 간격으로 연속된 평면요소들을 추출함으로써 처리시간과 효율성을 개선한 모델링 방법의 가능성을 확인할 수 있었다. 그러나 4개의 면으로 조합된 사각뿔지붕의 경우에는 4개 방향의 각 위치에서 3차원 평면을 추출할 수 있었으나, X-Y, X-Z, Y-Z 평면상에서 공간을 직각사각형 단위로 분할하기 때문에 사각뿔의 첨두부분을 표현할 수 있는 정확한 모양의 평면요소를 추출하는데 한계가 있었다. 또한 옥트리 분할은 기본적으로 육면체를 기반으로 공간을 분할하기 때문에 직각방향이 아닌 방향성을 지닌 건물요소가 존재할 경우 지붕구성요소의 추출 과정에서 한계점을 보인다. 따라서 보다 효과적으로 지붕을 모델링하기 위해서는 삼각형 등 지붕면의 형태와 경계부분의 방향성을 고려한 지붕요소 추출방법과, 추출된 각 평면요소를 조합하여 지붕의 패턴을 추정하고 이를 기반으로 지붕을 모델링할 수 있는 추가적인 연구가 필요하다.

## 감사의 글

본 연구는 정보통신부 및 정보통신연구진흥원의 IT신성장동력핵심기술개발 사업의 일환으로 수행하였음.[2007-F-042-01, 3차원 GIS기반 전파분석 고도화 기술 개발]

## 참고문헌

- 김홍식 (2005), 라이다에 의한 지붕유형의 자동분류와 모델링, 석사학위논문, 인하대학교, pp. 16-28.
- Impyeong Lee and Toni Schenk (2001), 3D Perceptual Organization of Laser Altimetry Data, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Volume XXXIV-3/W4 Annapolis, MD, 22-24 Oct. pp. 57-65.
- Abdullatif Alharthy and James Bethel (2004), Detailed building reconstruction from airborne laser data using a moving surface method, Proceeding, *XXISPRS Congress*, ISPRS, Turkey, 12-23 July, CommissionIII, pp. 213-218.
- Ellen Schwalbe (2004), 3D building model generation from airborne laser scanner data by straight line detection in specific orthogonal projections, Proceeding, *XXISPRS Congress*, ISPRS, Turkey, 12-23 July, CommissionIII, pp. 249-254.
- Miao Wang and Yi-Hsing Tseng (2004), Lidar data segmentation and classification based on octree structure, Proceeding, *XXISPRS Congress*, ISPRS, Turkey, 12-23 July. CommissionIII, pp. 308-314.
- Miao Wang and Yi-Hsing Tseng (2005), Automatic Plane Extraction from LiDAR Data Based on Octree Splitting and Merging Segmentation, Proceeding, *International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, IEEE, Seoul, 25-29 July. Vol. 5, pp. 3281-3284.
- Zwolak, Jason W., Boggs, Paul T. and Watson, Layne T. (2004), ODRPACK95: *A Weighted Orthogonal Distance Regression Code with Bound Constraints*, Technical Report TR-04-31, Computer Science, Virginia Tech. pp. 1-6.

---

(접수일 2007. 6. 25, 심사일 2007. 8. 2, 심사완료일 2007. 8. 20)