

# 라이다데이터 분할 알고리즘의 시뮬레이션 기반 성능평가 Simulation Based Performance Assessment of a LIDAR Data Segmentation Algorithm

김성준\* · 이임평\*\*  
Kim, Seong Joon · Lee, Im Pyeong

### 要 旨

라이다데이터를 이용한 다양한 활용알고리즘이 개발되고 있지만, 대부분의 제안된 알고리즘은 정성적인 검증만이 수행되고 있다. 알고리즘의 객관적이고 정량적인 검증을 위해서는 대상에 대한 참값(true value)을 알아야 하지만, 라이다데이터는 데이터 특성상 참값을 알기 어렵다. 본 연구에서는 모의 라이다데이터는 분할 알고리즘의 성능을 평가할 수 있는 참값을 가지고 있다는 점에 착안하여, 모의 라이다데이터를 이용하여 분할 알고리즘의 성능을 보다 객관적/정량적으로 평가해보고자 하였다. 이를 위해 먼저, 1) 분할 알고리즘의 결과를 객관적으로 가능할 수 있는 정량적인 평가요소들을 정의하고, 2) 3차원 도시모델을 입력 데이터로 모의 라이다데이터를 생성한 후, 3) 분할 알고리즘을 적용하여 객체표면을 나타내는 평면패치를 생성하였다. 마지막으로 4) 성능평가지표를 기준으로 생성된 패치에 대한 분석을 자동화하여 수행하였다.

핵심어 : 라이다, 시뮬레이션, 센서모델링, 분할, 성능평가

### Abstract

Many algorithms for processing LIDAR data have been developed for diverse applications not limited to patch segmentation, bare-earth filtering and building extraction. However, since we cannot exactly know the true locations of individual LIDAR points, it is difficult to assess the performance of a LIDAR data processing algorithm. In this paper, we thus attempted the performance assessment of the segmentation algorithm developed by Lee (2006) using the LIDAR data generated through simulation based on sensor modelling. Consequently, based on simulation, we can perform the performance assessment of a LIDAR processing algorithm more objectively and quantitatively with an automatic procedure.

Keywords : LIDAR, segmentation, simulation, performance assessment

## 1. 서 론

항공 라이다 센서는 지형지물의 표면위의 표본추출 (sampling)된 3차원 정보를 신속하고 정확하게 취득할 수 있다. 영상데이터와는 달리 3차원 위치의 절대좌표를 추출하기 위한 geo-referencing 처리과정이 거의 자동으로 수행되기 때문에, 이러한 항공 라이다데이터를 이용하여 지형지물에 대한 정밀한 3차원 모델을 자동으로 생성하는 연구가 많이 이루어지고 있다.

라이다데이터는 객체 표면위의 불규칙적으로 샘플링된 점들의 좌표로만 이루어져 있어서 밀도가 낮기 때

문에 대상물의 명확한 경계를 알아내기 어렵다. 그래서 대상물의 외곽선을 추출하여 3차원 모델링을 수행하는 영상데이터와는 달리 라이다데이터는 대상물의 표면 정보를 추정함으로써 생성된 평면패치를 이용한 3차원 모델링 연구가 주로 수행된다.

분할(segmentation) 알고리즘은 라이다데이터로부터 대상물의 표면패치를 생성하는 대표적인 프로세스(process)이다. 라이다데이터를 이용한 객체모델링에 관한 연구를 살펴보면, 분할을 통해 생성된 평면패치(planar patches)를 이용하여 객체의 외형을 구성하는 기본요소(primitives)-면(planes), 선(edges), 점(corners)

2010년 5월 13일 접수, 2010년 6월 11일 채택

\* 정희원 · 서울시립대학교 대학원 공간정보공학과 박사과정(sinus7953@uos.ac.kr)

\*\* 교신저자 · 정희원 · 서울시립대학교 도시과학대학 공간정보공학과 부교수(iplee@uos.ac.kr)

표 1. 라이다 데이터 분할 방법 분류

Edge-detection	3차원 좌표의 라이다데이터로부터 2.5차원의 거리영상(DSM)을 생성한 후, edge detection을 적용하여 패치의 경계를 수립함
Surface-growing	최소제곱법이나 Hough-transform을 기반으로 초기패치(seed patch)를 생성하고 기울기나 연속성 등과 같은 유사성을 기준으로 확장함
Scan-line	라이다데이터가 취득되는 scan-line상의 점집합을 기준으로 split-merge method를 적용함. 각 scan-line 점집합을 직선으로 분리한 후 인접하는 line segment와 합함으로써 패치를 생성함
Clustering	공간상의 feature의 기하/방사적 특성을 기준으로 k-means, maximum likelihood, fuzz-clustering 등의 클러스터링 기법을 적용함
Graph partitioning	Graph이론에 기반한 방법으로, 점 데이터로부터 graph를 수립한 후, 인접한 segment간의 유사성을 최소화하고 segment 내의 유사성을 극대화하도록 recursive partitioning을 수행함

을 추출하고, 다시 재구성(reconstruction)함으로써 객체모델링을 수행한다(김성준, 2009).

지금까지 연구된 라이다데이터의 분할(segmentation)은 방법에 따라 크게 표 1과 같이 분류 할 수 있다.

선행연구에서 개발된 분할 알고리즘을 검증하는 방법을 살펴보면, 생성된 평면패치나 분할기준 단서(cue)의 근사오차를 이용하였으며(Biosca and Lerma, 2008; Jiang and Bunke, 1994; Filin, 2002; Rottensteiner, 2003), Edge-detection 기반의 분할 알고리즘의 경우 기준 레퍼런스 영상을 생성하여 오차를 분석하였다(Jiang and Bunke, 1999). Chehata(2008)는 ISPRS에서 지표점을 추출하는 필터 테스트를 위해 공개한 라이다 데이터를 이용하여 정량적인 분석을 시도하고 다른 알고리즘과의 비교분석을 수행하였다. 그러나 제공된 데이터는 점밀도가 낮으며, 지면점과 비지면점을 구분한 레퍼런스 자료만 있어서 지면에 대한 결과 검증만 수행하였다.

제안된 대부분 연구들은 항공영상과의 중첩을 통한 육안 분석이나 생성된 패치에 대한 근사오차 분석에 머물렀으며, 보다 객관적이고 정량적인 분석이 미흡하였다. 객관적이며 정량적인 검증이 이루어지기 위해서는 라이다데이터의 개별점의 레이저 펄스가 반사한 실제 지점에 대한 객체표면 정보를 알아야 하지만, 데이터 특성상 육안(manually)으로 개별 점에 대한 객체표면 정보를 확인하는 것은 비효율적이며 어렵다.

본 연구에서는 시뮬레이션을 이용하여 분할 알고리즘의 성능에 대한 객관적/정량적인 평가를 하고자 한다. 센서 모델링에 기반한 라이다 시뮬레이션은 사용자에게 다양한 대상물과 시스템 변수에 따른 모의 데이터와 개별점이 반사한 지점의 객체 표면정보를 제공한다. 그리고 이러한 정보를 기준데이터로 이용하면, 개별 점과 표면에 대한 평면패치의 분할 성공 여부를 보다 객관적으로 확인할 수 있게 된다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 본 연구에서 이용하는 주요 알고리즘인, 라이다 시뮬레이션(simulation)과 분할(segmentation)에 대한 기본 이론을 설명하며, 3장에서는 분할 알고리즘에 대한 검증 방법을 제안한다. 그리고 4장에서는 제안된 방법을 실제 데이터에 적용한 실험에 대한 내용을 포함한다. 마지막으로 5장에서는 본 연구의 결론을 논하고자 한다.

## 2. 이론적 배경

본 연구는 김성준(2006)이 제안한 센서모델링에 기반한 라이다 시뮬레이션 방법을 이용하여 이임평(2006)이 제안한 라이다데이터의 분할기법을 검증한다. 본 장에서는 연구에 사용될 알고리즘에 대한 간략한 이론을 소개한다.

### 2.1 라이다 시뮬레이션

라이다 시뮬레이션은 3차원 도시모델과 같이 3차원 객체데이터를 입력데이터로 사용하여 주어진 시스템 변수에 따른 실제 라이다시스템이 획득하는 데이터를 모의 생성하는 것을 말한다. 여기에서 시스템 변수란 라이다 시스템의 설정 값으로 플랫폼(platform), 레이저펄스 특성(Laser Pulse Characteristics), 기록방법(Recording Methodology), 정확도/정밀도(Precision and Resolution), 위치자세 시스템(Positioning System)

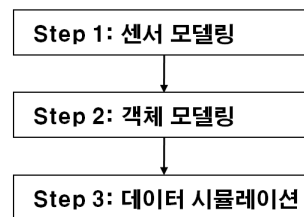


그림 1. 모의 데이터 생성 과정

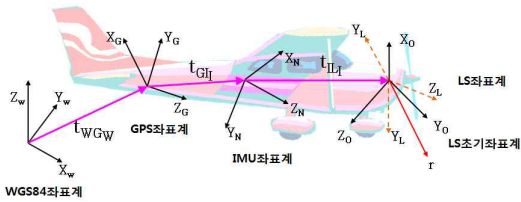


그림 2. 라이다시스템 내부의 개별센서의 좌표계간 관계 등을 의미한다. 라이다 시물레이션은 크게 3단계의 처리과정으로 구분된다(그림 1).

2.1.1 센서모델링

먼저 센서모델링에서는 개별센서 및 지상에서 정의된 다양한 좌표계간의 기하학적인 관계를 설정하고, 이를 기반으로 시스템 내부 센서의 기하모델링을 통해 센서 방정식을 수립한다. 개별센서(GPS, IMU, Laser scanner)의 데이터를 조합하기 위해서는 개별 좌표계로 표현된 데이터를 하나의 공통된 좌표계로 변환할 수 있어야 하며, 이러한 좌표변환을 위해서는 그림 2와 같이 개별 좌표계 사이의 기하학적 관계 수립이 선행되어야 한다. 식(1)은 센서 방정식으로써 개별센서인 GPS, IMU 및 LS의 정보를 조합하여 대상물의 표면에서 레

이저 펄스가 반사된 지점의 3차원 좌표를 계산하기 위한 공식이다. 자세한 내용은 김성준(2006)에 기술되어 있다.

$$P_w^* = R_{GW} \Delta R_{IG} R_{IG} (\Delta R_{LL} R_{LL} \Delta R_{OL} R_{OL} u_z (r + \Delta r) + t_{GL_i} + \Delta t_{GL_i}) + t_{WG_w} + \Delta t_{WG_w} \quad (1)$$

2.1.2 객체모델링

객체모델링은 시물레이션의 입력데이터인 3차원 객체모델에 대한 데이터를 설계하고 생성, 구축하는 것을 의미한다. 데이터 모델을 설계함에 있어서 고려해야하는 사항은 고속의 공간검색 및 연산이 가능해야 한다는 것이다. 이는 라이다 시물레이션을 위해 초당 수십만 개의 레이저 펄스를 모델링하고 펄스와 만나는 객체표면을 탐색해야하기 때문이다. 김근한(2009)은 이러한 점을 고려하여 시물레이션에 적합한 데이터 모델을 설계하였으며, 효율적인 공간연산이 수행되기 위하여 공간 데이터베이스 시스템을 이용하였다.

2.1.3 데이터 시물레이션

데이터 시물레이션에서는 전단계의 센서모델링과 객체모델링을 기반으로 모의 레이저빔을 생성하고 빔과 교차하는 평면을 탐색하여 펄스가 반사한 지점의 모의

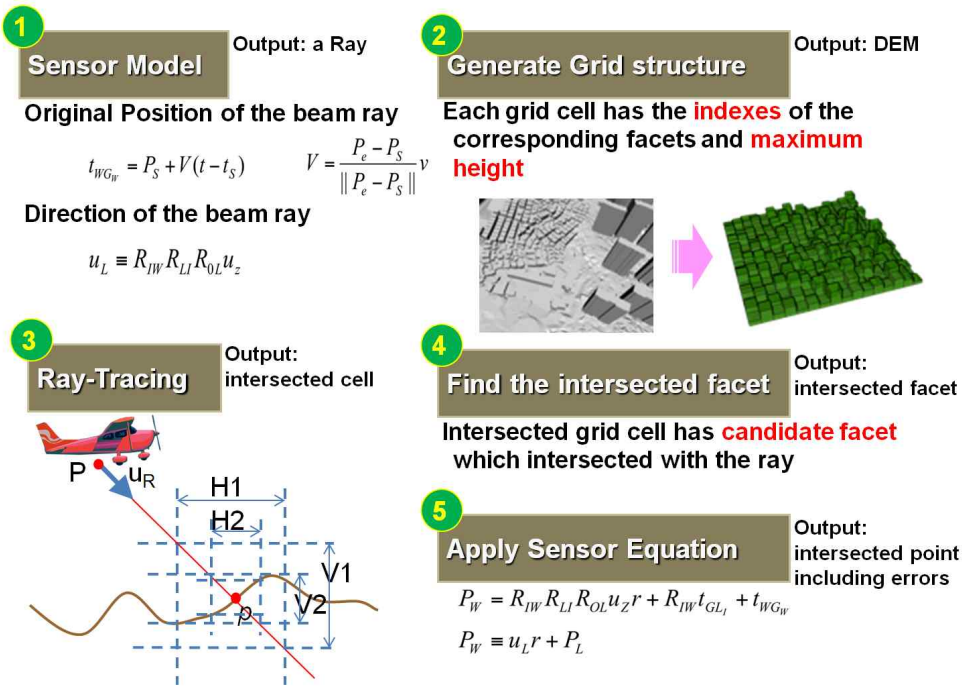


그림 3. 데이터 시물레이션 방법

라이다데이터를 생성한다. 보다 구체적인 방법론은 그림 3과 같다.

먼저 송신된 레이저빔의 원점과 방향을 이용하여 직선을 정의한다. 이때 방향벡터와 원점은 시스템 변수를 이용하여 계산할 수 있다. 그리고 객체평면의 높이 값을 포함하는 셀 기반의 DEM을 생성한다. 그런 후에 'Ray-Tracing' 알고리즘을 사용하여 정의된 직선과 교차하는 DEM의 셀을 탐색함으로써 빔과 교차하는 객체평면을 찾아내고 교차점까지의 거리를 계산한다. 마지막으로 거리와 시스템오차를 앞에서 수립한 센서방정식에 적용하여 레이저 펄스의 반사지점 위치를 계산한다.

2.2 라이다데이터 분할

라이다데이터의 분할은 3차원 공간상의 객체표면에 불규칙적으로 분포하는 점들을 그룹핑하여 연속된 표면패치로 구성하는 것을 의미한다(이임평, 2006). 라이다데이터를 분할하기 위해서 이임평(2006)이 제안한 방법의 주요과정은 다음과 같다(그림 4).

먼저 개별점에 대하여 일정반경 내의 이웃하는 점들과 인접성 수립하고 이를 기반으로 초기패치 후보를 생성한다. 그리고 생성된 초기패치의 평면 계수와 평면근사오차를 계산하여 실제 의미 있는 평면으로 성장할 가능성이 높은 것부터 통계적 검사를 통해 영역확장을 시킨다. 영역확장을 통해 최종적으로 성장한 패치는 근사된 평면 계수와 패치에 포함된 점, 경계로 정의되며 이로부터 다양한 속성을 유도할 수 있다.

2.2.1 인접성 수립

인접성 수립은 각 개별점에 대하여 일정거리 이내의 이웃하는 점들과의 관계를 설정해주는 것을 의미한다. 이를 위해 먼저 각 점에 대하여 일정한 크기의 반지름을 갖는 구를 설정하고 안에 존재하는 점들에 대하여 인접성을 설정한다.

2.2.2 초기패치 생성

인접성 수립이 끝나면, 이를 근거로 공간적으로 인접한 적절한 개수의 점을 선택하여 초기패치 후보를 생성

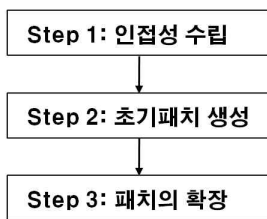


그림 4. 라이다데이터의 분할 과정

한다. 이때 선택되는 점의 개수는 점밀도를 고려하여 실제의 표면을 표현할 수 있도록 한다. 그리고 초기패치 후보들에 포함된 점들을 평면에 근사하기 위한 평면방정식을 기반으로 관측방정식을 수립한다.

$$y = A\xi + e, e \sim N(0, \sigma_0^2 I) \tag{2}$$

식 (2)에서 관측값 벡터  $y$ 는 z좌표들, 설계행렬  $A$ 는 식 (3)과 같이  $x, y$ 좌표들 대입한다.  $\xi$ 는 평면계수를 나타내는 미지수 벡터이다.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_n & y_n \end{bmatrix} \tag{3}$$

최소제곱법을 적용하여 초기패치의 평면 계수  $\hat{\xi}$ 를 식 (4)과 같이 추정한다. 잔차  $\tilde{e}$ 는 식 (5)와 같이 계산되고, 잔차를 이용한 분산요소의 추정값  $\hat{\sigma}_0^2$ 는 식 (6)과 같이 계산된다.

$$\hat{\xi} = (A^T A)^{-1} A^T y \tag{4}$$

$$\tilde{e} = y - A\hat{\xi} \tag{5}$$

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{\tilde{e}^T \tilde{e}}{n-3} \tag{6}$$

2.2.3 패치의 확장

초기패치 후보가 생성되면, 평면 근사 오차가 작은

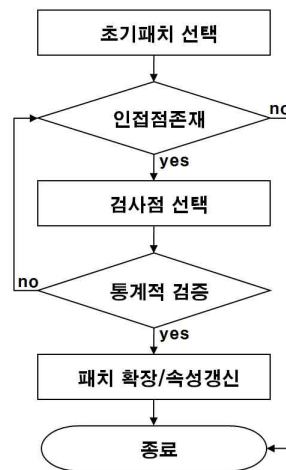


그림 5. 패치확장 순서도

후보패치를 우선적으로 영역확장을 시키게 된다. 먼저 인접성을 기반으로 주변 점을 선택하고 패치에 포함시킬 것인지 포함시키지 않을 것인지에 대한 통계적인 검사를 반복하면서 확장된다. 그 순서는 그림 5와 같다. 이 때 통계적 검사는 평면근사오차  $\hat{\sigma}_0^2$ 를 이용한다. 검사 점을 패치에 포함시키기 전과 후의  $\hat{\sigma}_0^2$ 의 비율을 확률변수로 하고 유의수준을 0.05로 설정한 F-검정(F-test)을 수행한다.

### 3. 방법론

라이다데이터는 지형지물의 표면에 불규칙적으로 위치하는 점데이터의 집합이다. 그러므로 모든 점에 대하여 개별 점이 반사한 지점의 객체 표면을 육안으로 식별하는 것은 거의 불가능하며, 따라서 분할 알고리즘의 결과물인 평면패치가 성공적으로 생성되었는지에 대한 확인은 정성적일 수밖에 없다. 또한 알고리즘의 성능을 평가하기 위해서는 다양한 시스템변수로 촬영된 다양한 객체에 대한 라이다데이터가 필요하다.

본 연구에서는 이러한 난제를 해결하기 위해 시뮬레이션으로 생성된 모의 라이다데이터를 이용한다. 분할 알고리즘 성능평가에 모의 라이다데이터를 사용하면 개별점이 반사한 객체표면의 정확한 평면정보를 알 수 있기 때문에 이를 성능평가의 기준데이터로써 활용할 수 있다. 그리고 다양한 시스템 변수 값에 대한 모의 라이다데이터를 생성함으로써 보다 다양한 종류의 데이터를 분할 알고리즘의 성능평가에 적용할 수 있다.

본 연구에서 제안하는 분할 알고리즘의 성능평가 방법의 주요 흐름은 그림 6과 같다. 먼저, 1) 분할 알고리즘의 결과를 객관적으로 기능할 수 있는 정량적인 평가요소들을 정의하였다. 그리고 2) 3차원 도시모델을 입력 데이터로 모의 라이다데이터를 생성한 후, 3) 분할 알고리즘을 적용하여 객체표면에 대한 평면패치를 생

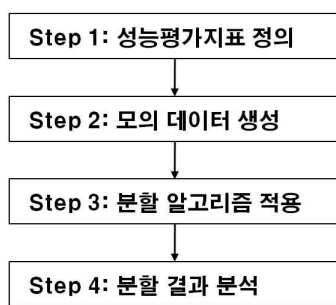


그림 6. 분할기법의 성능평가 방법

표 2. 점/패치 기반의 성능평가 지표

Point based Criterion	Patch based Criterion
Correctly segmented	Correctness
Correctly unsegmented	Completeness
Incorrectly segmented	Undersegmentation
Incorrectly unsegmented	Oversegmentation

성한다. 마지막으로 4) 정의된 성능평가지표를 기준으로 생성된 패치에 대한 분석을 자동화하여 수행한다.

#### 3.1 성능평가지표 정의

분할 알고리즘의 성능을 정량적으로 평가하기 위한 지표로 점기반 및 패치기반의 지표를 정의하였다. 점기반 지표는 라이다데이터에 포함된 개별 점들이 반사된 지점의 실제 객체표면에 해당하는 평면패치로 정확하게 분할되는가를 나타내도록 정의하였다. 패치기반 지표는 분할을 통해 생성된 패치가 실제 지형지물의 표면들을 정확하게 표현하는가를 나타내도록 정의하였다. 예를 들어, 실제로 존재하지 않는 패치는 생성되지 않아야 되며, 하나의 객체표면으로부터 하나의 평면패치만 생성되어야 한다. 이를 고려하여 선정된 성능평가지표는 표 2와 같다.

##### 3.1.1 점기반지표

점기반지표의 세부항목으로 ‘Correctly segmented’, ‘Correctly unsegmented’, ‘Incorrectly segmented’, ‘Incorrectly unsegmented’를 정의하였다. 여기서 1) Correctly segmented는 실제객체표면에 해당하는 패치에 정확하게 분할된 경우를 말하며, 2) Correctly unsegmented는 이상점(outlier)과 같이 실제객체표면에 위치하지 않은 점들이 패치로 분할되지 않은 경우를 의미한다. 3) Incorrectly segmented는 이상점(outlier)이 분할결과 패치에 포함되거나 실제객체표면에 해당하는 패치와 다른 엉뚱한 패치로 분할되는 경우를 의미한다. 4) Incorrectly unsegmented는 패치에 포함되어야 하는 점이 분할이 안된 경우를 의미한다.

##### 3.1.2 패치기반지표

패치기반의 평가요소로는 ‘Correctness’, ‘Completeness’, ‘Undersegmentation’, ‘Oversegmentation’을 정의하였다. 여기서 1) Correctness는 추출된 전체 패치 중에 실제로 존재하는 지형지물의 표면을 나타내는 패치의 비율이며, 2) Completeness는 생성되어야 할 패치 즉, 실제 존재하기 때문에 분할결과 패치로 나타나야 할 객체 표면 중에 실제로 추출된 패치의 비율이다.

3) Undersegmentation은 두 개 이상의 객체표면이 잘못 병합되어 하나의 평면패치로 생성된 경우를 말하며,  
 4) Oversegmentation은 하나의 객체표면이 잘못 분할되어 두 개 이상의 평면패치가 생성되는 경우를 의미한다.

3.2 모의 라이다데이터 생성 및 분할 수행

모의 라이다데이터를 생성하기 위해서는 입력데이터인 3차원 객체모델이 필요하다. 라이다 시뮬레이션에 사용하는 입력데이터의 기하모델은 경계표현(boundary representation, B-rep)방식이다. B-rep은 개별 건물을 하나의 다면체(polyhedral) 모델로 표현하며 이를 구성하는 면(facet), 에지(edge), 점(vertex)의 리스트로 나타내어진다. 3차원 객체모델은 김성준(2007)이 제안한 방법을 적용하여, 도화원도를 기반으로 지형과 건물에 대한 3차원 모델데이터를 생성한다. 그리고 이를 입력데이터로 라이다 시뮬레이션을 수행한다(그림 7). 마지막으로 모든 점의 좌표값에 우연오차를 포함시킨다. 모의 라이다데이터가 생성되면 여기에 분할 알고리즘을 적용한다. 이 때 알고리즘에 사용되는 변수(parameters)는 데이터의 점밀도에 따라 적절하게 결정한다.

3.3 분할결과와 자동 분석

라이다 시뮬레이션 과정과 분할알고리즘을 적용하면 그림 8과 같은 관계를 갖는 데이터셋을 획득할 수 있다. 시뮬레이션의 결과물인 모의 라이다데이터는 모든 점에 대하여 반사된 지점의 표면(polygon)정보를 가지고 있으며, 분할의 결과물인 평면패치는 패치를 구성하

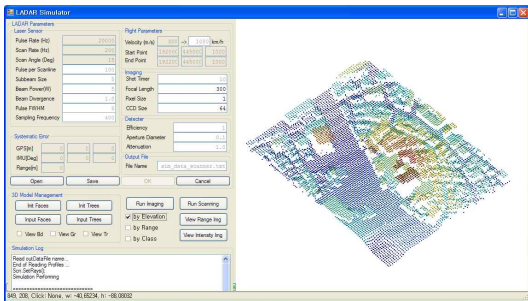


그림 7. 라이다 시뮬레이션 프로그램

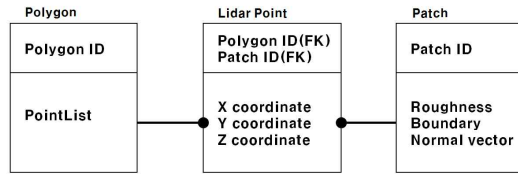


그림 8. 객체표면-모의데이터-평면패치의 ERD

는 모의 라이다 점데이터 정보를 포함하고 있다. 최종적으로 생성된 모의 라이다데이터와 3차원 객체표면, 평면패치간의 관계를 ERD(Entity-Relationship Diagram)로 나타내면 그림 8과 같다. 결국 표면을 나타내는 면(polygon)과 패치(patch)의 관계는 다대다(many to many)가 된다. 이는 과대분할(oversegmentation)과 과소분할(undersegmentation)이 존재함을 의미한다.

본 연구에서는 객체표면과 생성된 패치와의 관계를 보다 명확히 파악하기 위해서 ‘객체표면-패치’ 관계표를 구성한다. 표 3은 객체표면과 평면패치의 관계를 나타내는 예제이다. 첫 번째 행(first row)은 각 평면패치의 인덱스를, 첫 번째 열(first column)은 각 객체표면의 인덱스를 나타낸다. 그리고 첫 번째 행의 마지막 열(column)과 첫 번째 열(column)의 마지막 행(row)에는 각각 ‘Unsegmented’와 ‘Outliers’라는 필드(field)를 추가한다.

이렇게 설계된 관계표에 ‘Lidar Point’ 테이블의 외래키(foreign key)(그림 8)를 이용하여 해당 객체표면과 평면패치의 인덱스를 가지고 있는 점의 개수를 채운다. 이러한 ‘객체표면-패치’ 관계표를 구성하면 개별 패치를 기준으로 관련된 객체표면과, 반대로 개별 객체표면을 기준으로 관련된 평면패치를 알 수 있다. 또한, ‘Unseg-mented’의 열과 ‘Outliers’의 행으로부터 각각 어느 객체표면상의 점들이 분할이 실패했는지, 이상점이 어느 패치로 오분류 되었는지를 판단할 수 있다.

표 3을 살펴보면 먼저, 총 30개의 이상점 중에 23개가 이상점으로 제대로 미분할 되었으며, 7개의 점이 평면패치로 오분할 되었음을 알 수 있다. 패치에 대해서는 1번 패치와 2번 객체표면 인덱스를 갖는 점의 개수가 87개이며, 이로부터 분할결과로 2번 객체표면을 표현하는 1번 패치가 생성되었음을 알 수 있다. 2번 패치

표 3. ‘객체표면-패치’ 관계표(예시)

ID	Patch 1	Patch 2	Patch 3	Patch 4	Patch 5	Unsegmented
Polygon 1	0	51	2	0	0	3
Polygon 2	87	0	0	1	0	1
Polygon 3	0	74	31	0	0	0
Polygon 4	0	3	0	28	0	0
Outliers	2	0	0	0	5	23

의 경우 1번 객체표면(51개)과 3번 객체표면(74개)이 관계가 있음을 확인할 수 있고, 이로부터 두 개 이상의 객체표면(1, 3번)으로부터 하나의 패치(2번)가 생성되었기 때문에 과소분할(undersegmentation)이 이루어졌음을 알 수 있다. 이와 같은 방법으로 3번 객체표면과 관계있는 2번과 3번 패치는 과대분할(oversegmentation)임을 알 수 있다. 마지막으로 분할 알고리즘에서 평면패치를 구성하는 최소 점 개수보다 작은 것들 (Patch 2 - Polygon 4, Patch 3 - Polygon 1, Patch 4 - Polygon 2)은 오분류의 결과로 판단할 수 있다.

이러한 ‘객체표면-패치’ 관계표를 기반한 결과분석을 자동화하기 위해서는 먼저 객체표면과 평면패치간의 주관계(major-relationship)를 수립해야 한다. 주관계는 생성된 각각의 패치가 실제 어떤 객체표면을 표현하는가를 나타내는 것으로 구체적인 설정방법은 다음과 같다. 먼저, 객체표면을 기준으로 각각의 객체표면과 가장 큰 점의 개수를 지닌 평면패치를 탐색하고, 이들의 인덱스를 주관계표(major-relationship table)에 추가한다. 그리고 반대로 평면패치를 기준으로 각 패치와 가장 큰 점의 개수를 지닌 객체표면을 탐색하여 각 패치와 표면의 인덱스를 주관계 표에 추가한다. 이렇게 생성된 주관계표는 표 4와 같다. 생성된 ‘객체표면-패치’ 관계표와 주관계표(major-relationship table)를 이용하여 표 5와 같이 점기반과 패치기반의 성능평가지표를 계산할 수 있다.

표 4. 객체표면과 평면패치의 주관계표의 예시

객체표면ID	평면패치ID
1	3
2	8
3	9
...	...

표 5. ‘객체표면-패치’ 관계표에 기반한 성능평가지표 계산방법

점기반	Correctly segmented	‘객체표면-패치’ 관계표에서 주관계에 속하는 점의 개수/비율
	Correctly unsegmented	이상점이면서 분할되지 않은 점의 개수/비율
	Incorrectly segmented	이상점이면서 분할된 점과 이상점이 아니면서 ‘객체표면-패치’ 관계표에서 주관계에 속하지 않는 점의 개수/비율
	Incorrectly unsegmented	이상점이 아니면서 분할되지 않은 점의 개수/비율
패치기반	Correctness	추출된 전체 패치개수에 대한 주관계표에 포함된 패치 비율
	Completeness	객체표면의 전체 개수에 대한 주관계표에 포함된 객체표면의 비율
	Undersegmentation	‘객체표면-패치’ 관계표에서 두 개 이상의 객체표면과 주관계가 수립된 패치의 개수
	Oversegmentation	‘객체표면-패치’ 관계표에서 두 개 이상의 평면패치와 주관계가 수립된 객체표면의 개수

#### 4. 적용 및 검토

제안된 방법을 적용하여 실제 분할 알고리즘에 적용하였다. 이를 위해서 도심지에 대한 3차원 객체모델을 구축하고, 이를 입력으로 모의 라이다데이터를 생성하였다. 그리고 모든 점에 대하여 우연오차와 임의의 점에 대하여 과대오차를 삽입하였다. 오차가 포함된 모의 데이터에 분할 알고리즘을 적용하고 성능평가지표에 기반하여 결과를 분석하였다.

##### 4.1 실험데이터

3차원 객체(도시)모델은 서울특별시 영등포구 지역의 도화원도를 이용하여 구축하였다. 구축 대상물은 건물과 지형이며 다면체로써 기하모델을 표현하였다(그림 9).

##### 4.2 모의 라이다데이터 생성

라이다 시뮬레이션에 필요한 입력요소(시스템변수)는 크게 플랫폼의 거동정보, 라이다 시스템의 속성, 시

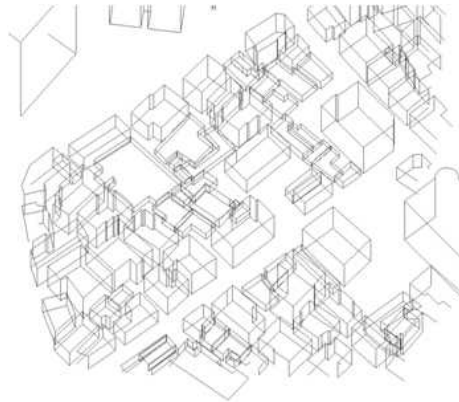


그림 9. 3차원 객체모델의 모습



스텝 오차로 구분할 수 있다. 플랫폼은 200m/s의 속도로 100m를 이동하도록 하고, 초당펄스발사회수는 40,000Hz, 초당스캔회수는 400Hz로 설정하였다. 본 연구에서는 시스템오차가 포함된 데이터가 필요하지 않기 때문에 정오차는 없는 것으로 가정하였다.

시뮬레이션 결과 총 427개의 객체표면을 기반으로 20,100개의 모의 점데이터가 생성되었으며, 점밀도는 약 1.9개/m<sup>2</sup>로 나타났다. 여기에 그림 10과 같이 임의의 1% 점에 과대오차를 삽입함으로써 이상점(outlier)을 생성하였고, 모든 점에 대하여 0.1m의 표준편차를 갖는 우연오차를 삽입하였다. 그림 11은 분할알고리즘에 적용할 최종적인 모의 라이다데이터의 모습이다.

그림 12는 과대오차를 삽입한 모의 라이다데이터로부터 Delaunay triangulation을 생성한 모습이다. 자세히 살펴보면 주위의 이웃하는 점들보다 돌출한 부분들이 있음을 알 수 있다.

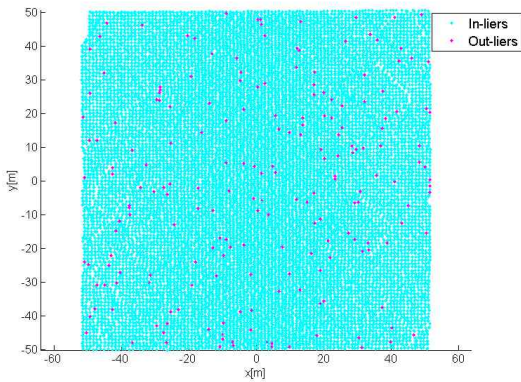


그림 10. 과대오차의 분포

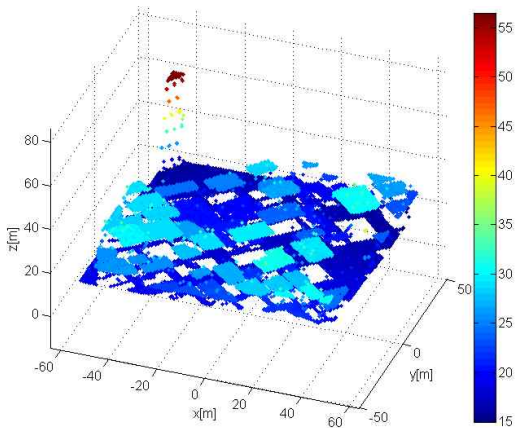


그림 11. 오차가 포함된 모의 점데이터

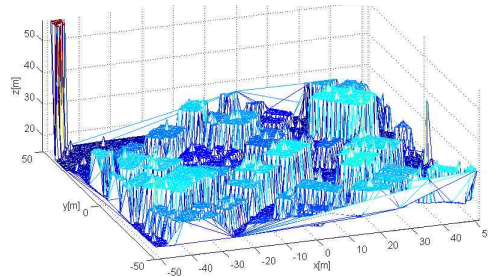


그림 12. 모의 라이다 데이터로부터 생성한 Delaunay triangulation의 모습

### 4.3 분할알고리즘 적용

생성한 모의 라이다데이터에 분할 알고리즘을 적용한 결과 총 74개의 평면패치가 생성되었다. 그 중 59개의 평면패치가 지붕면을 표현하고 있었으며, 나머지는 지표면을 의미하고 있었다. 그림 13과 그림 14는 생성된 평면패치를 구성하는 점들을 가시화한 것이다.

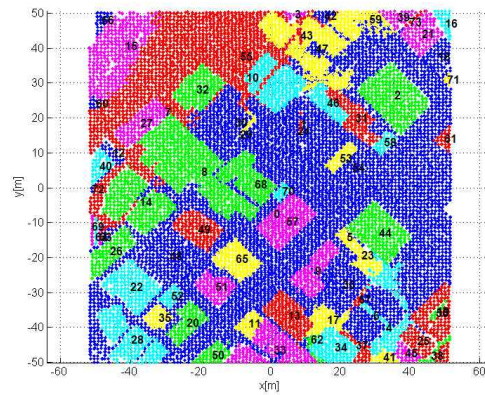


그림 13. 최종적으로 생성된 평면패치

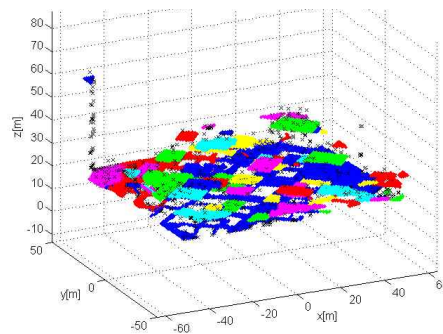


그림 14. 평면패치에 포함된 점(·)과 포함되지 않은 점(×)



4.4 성능평가지표 계산

분할 알고리즘의 성능평가를 위한 지표계산을 위해 ‘객체표면-패치’ 관계표를 생성하였다. 본 연구는 건물의 지붕면을 표현하는 평면패치들이 성공적으로 생성되었는지를 판단하기 위하여 ‘객체표면-패치’ 관계표에는 지붕면과 관계된 점데이터와 평면패치만을 사용하였다. 표면의 경계가 명시적인 지붕면과 달리 지표면은 이웃하는 객체표면과 연속적으로 연결되어 있기 때문에 제한된 지표요소를 기반한 성능평가에는 한계가 있다.

총 85개의 객체표면에서 9,703개의 모의 점(98개의 이상점이 포함)을 기반으로 59개의 평면패치가 생성되었다. 실험결과를 바탕으로 생성한 ‘객체표면-패치’ 관계표와 주관계표(major-relationship table)를 이용하여 표 6, 표 7과 같이 성능평가지표를 자동으로 계산하였다.

이임평(2006)이 제안한 분할 알고리즘은 점기반의 성능평가(표 6)에서 약 97%(이상점이 아닌 9,605개의 점 중에서 9,327개의 점이 ‘객체표면-패치’ 관계표에서 주관계에 해당)의 점이 합리적으로 평면패치에 분할되었고, 이상점에 대해 약 98%(총 98개의 이상점 중에서

96개의 점이 분할되지 않음)의 분별력을 보여주었음을 알 수 있었다. 패치기반의 성능평가(표 7)에서도 전체 지붕객체표면의 약 99%가 평면패치로 생성되었으며 모든 평면패치는 실제 존재하는 객체의 표면을 의미하고 있음을 보여주었다. 그리고 4개의 표면패치에 대한 과다분할과 13개의 평면패치에 대해 과소분할(undersegmentation)이 발생하였다.

표 6. 점기반 성능평가 지표

지표	Correctly segmented	Correctly unsegmented	Incorrectly segmented	Incorrectly unsegmented
개수	9,327	96	5	275
비율	96.12 %	0.99 %	0.05 %	2.84 %
합	Success: 97.11 %		Fail: 2.89%	

표 7. 패치기반 성능평가 지표

Correctness	Completeness	Undersegmentation	Oversegmentation
100 %	98.82 %	13	4

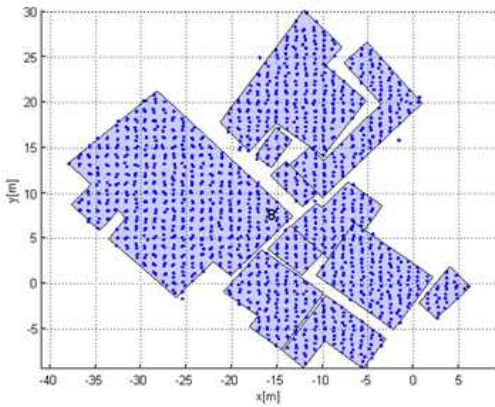


그림 15. 과소분할(undersegmentation)의 사례

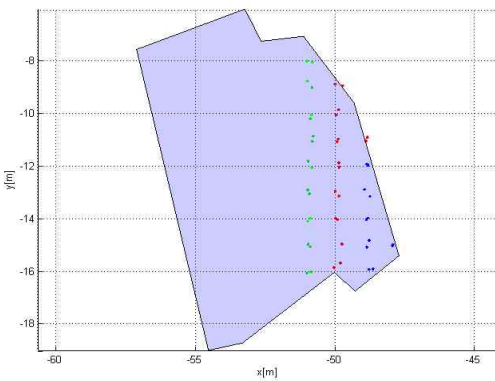
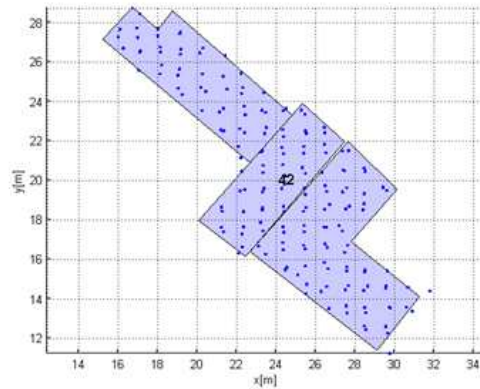
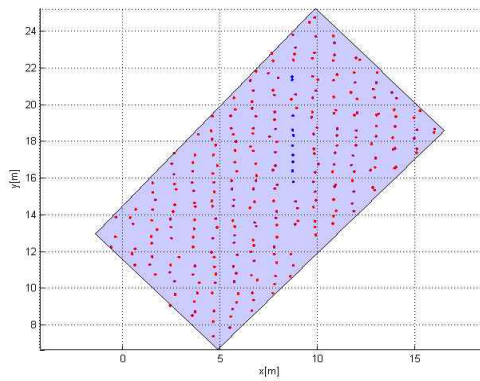


그림 16. 과다분할(oversegmentation)의 사례



과소 분할된 영역을 살펴본 결과 그림 15에서와 같이 높이가 비슷한 지붕객체 표면들이 매우 근접하게 위치해 있었음을 알 수 있었다. 과다 분할된 영역의 경우 그림 16과 같이 분할된 평면패치를 구성하는 점들의 분포가 평면상에서 스캔라인(swath)을 따라 직선의 형태를 이루고 있었다. 이는 스캐닝 메커니즘 특성으로 인한 점분포와 우연오차로 인하여, 국부영역에서 주변 패치의 근사오차보다 더 작은 평면근사오차를 갖는 초기패치가 생성되었으며, 그 결과로 스캔라인을 따라 길쭉한 형태의 평면패치가 생성된 것으로 판단된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 라이다 센서모델링에 기반한 시물레이션을 이용하여 모의 라이다데이터를 생성하고 이를 이용한 라이다 분할(segmentation) 알고리즘의 성능평가를 수행하였다. 개발된 알고리즘의 객관적이고 정량적인 검증을 위해서는 대상에 대한 참값(true value)을 알아야 하지만, 라이다데이터는 데이터 특성상 참값을 알기 어렵다. 본 연구에서는 모의 라이다데이터는 분할 알고리즘의 성능을 평가할 수 있는 참값을 가지고 있다는 점에 착안하여, 모의데이터를 성능평가에 활용하였으며 그 결과, 분할알고리즘의 성능을 보다 객관적이고 정량적으로 평가할 수 있었다. 그러나 매우 복잡한 구조를 갖는 실제 지붕면의 특성을 잘 반영하지 못한 단순한 박스형 3차원 모델에 대해서만 수행하였다는 한계가 있으며, 향후 연구에서는 이러한 점을 고려하여 보다 실세계의 기하구조를 잘 반영하는 데이터를 이용하여, 건물 지붕면 뿐 만 아니라 지표면을 포함하는 다양한 객체를 대상으로 하는 분할 알고리즘 성능평가 방법을 연구할 예정이다.

라이다 시물레이션 기법은 분할 알고리즘 뿐 만 아니라 다양한 라이다 활용 알고리즘의 개발 및 성능평가에 많은 도움을 줄 수 있을 것으로 기대한다.

## 감사의 글

이 논문은 2007년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(331-2007-1-D00485).

## 참고문헌

1. 김근한, 김혜영, 전철민, 2009, "레이저레이더 시물레이션을 위한 3차원 데이터 모델의 성능 테스트", *한국지*

2. 김성준, 민성홍, 이임평, 최경아, 2008, "항공라이다시 시스템의 기하모델링 및 데이터 시물레이션", *한국측량학회지*, 제26권, 3호, pp.311-320.
3. 김성준, 이임평, 2009, "3차원 건물의 정규화", *대한원격탐사학회*, 2009년도 춘계학술대회, pp.296-300.
4. 김성준, 이임평, 2010, "폴웨이브폼 라이다의 반사파형 시물레이션", *대한원격탐사학회지*, 제26권, 1호, pp.1-10.
5. 오소정, 이임평, 김성준, 최경아, 2008, "3차원 소음지도 제작을 위한 도화원도와 수치지도를 이용한 도시공간모델 생성", *대한원격탐사학회지*, 제24권, 2호, pp.179-188.
6. 이임평, 2006, "항공 라이다 데이터의 분할: 점에서 패치로", *한국측량학회지*, 제 24권, 1호, pp.111-121.
7. Biosca, J. M. and Lerma J. L., 2008, "Unsupervised robust planar segmentation of terrestrial laser scanner point clouds based on fuzzy clustering methods", *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, ISPRS, Vol.63, No.1, 84-98.
8. Chehata, N., David, N., and Bretar, F., 2008, "LIDAR data classification using hierarchical K-means clustering", *Proc. of ISPRS Congress Beijing 2008*, Vol.37, pp.325-330.
9. Filin, S., 2002, "Surface clustering from airborne laser scanning data", *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol.34, pp.117-124.
10. Fuchs, F., 2001, "Building reconstruction in urban environment: a graph-based approach", *Automatic Extraction of Man-made Objects from Aerial and Space Images (III)*, Baltsavias, E.P., Gruen, A. and Gool, L.V. (ed.), Taylor & Francis, 205-215.
11. Gorte, B., 2002, "Segmentation of TIN-structured laser altimetry points clouds", *Symposium on Geospatial Theory, Processing and Application*.
12. Haxhimusa, Y. and Kropatsch, W.G., 2003, "Hierarchy of partitions with dual-graph contraction", *Proceedings of German Pattern Recognition Symposium*, LNCS, Vol.2871, pp.338-345.
13. Heath, M., Sarkar, S., Sanocki, T., and Bowyer, K., 1998. Comparison of edge detectors a methodology and initial study, *Computer Vision and Image Understanding*, 69, 38-54.
14. Lee, I., and Schenk, T., 2002, "Perceptual organization of 3D surface points", *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and*

- Spatial Information Sciences, Vol.34, pp.193–198.
15. Jiang, X.Y., and Bunke, H., 1994, “Fast segmentation of range images into planar regions by scan line grouping”, *Machine Vision and Applications*, Vol.7, No.2, pp.115–122.
  16. Jiang, X. and Bunke, H., 1999, “Edge detection in range images based on scan line approximation”, *Computer Vision and Image Understanding*, Vol.73, No.2, pp.183–199.
  17. Khalifa, I., Moussa, M., and Kamel, M., 2003, “Range image segmentation using local approximation of scan lines with application to CAD model acquisition”, *Machine Vision Applications*, Vol.13, No.5–6, pp.263–274.
  18. Kim, T. and Muller, J.P., 1999, “Development of a graph-based approach for building detection”, *Image and Vision Computing*, Vol.17, No.1, pp.3–14.
  19. Kim, S., Min, S., Kim, G., Lee, I., and Jun, C., 2009, “Data Simulation of an Airborne LIDAR System”, *Proceedings of the SPIE, Laser Radar Technology and Applications*, Vol.7323.
  20. Pu, S., and Vosselman, G., 2006, “Automatic extraction of building features from terrestrial laser scanning”, *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol.36.
  21. Roggero, M., 2001, “Airborne laser scanning: clustering in raw data”, *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing*, Vol.34, pp.227–232.
  22. Rottensteiner, F., 2003, “Automatic generation of high-quality building models from lidar data”, *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol.23, No.6, pp.42–50.
  23. Sampath, A., Shan, J., 2006, “Clustering based planar roof extraction from lidar data”, *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing Annual Conference*.
  24. Sampath, A., Shan, J., 2008, “Building Reconstruction from Airborne Lidar Data Based on Clustering Analysis”, *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing Congress*.
  25. Sappa, A.D. and Devy, M., 2001, “Fast range image segmentation by an edge detection strategy”, *Proceedings of 3rd International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling*, pp.292–299.
  26. Shan, J., Sampath, A., 2008, “Chapter 15, Building extraction from LiDAR point clouds based on clustering techniques”, in Shan, J. and Toth, C., *Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing*, CRC Press/Taylor & Francis Group, pp. 423–446.
  27. Sithole, G., and Vosselman, G., 2003, “Automatic structure detection in a point cloud of an urban landscape”, *Proceedings of 2nd GRSS/ISPRS Joint Workshop on Remote Sensing and Data Fusion over Urban Areas*, pp.67–71.
  28. Wang, L., and Chu, H., 2008, “Graph theoretic segmentation of airborne LiDAR data”, *Proceedings of SPIE*, Vol.6979.