Korean Journal of Remote Sensing, Vol.24, No.2, 2008, pp.141~152

항공 LiDAR 데이터를 이용한 3차원 건물모델링

조홍범 · 조우석† · 박준구 · 송낙현
인하대학교 지리정보공학과

3D Building Modeling Using Aerial LiDAR Data

Hongbeom Cho, Woosug Cho†, Junku Park, and Nakhyun Song
Department of Geoinformatic Engineering, Inha University

Abstract : The 3D building modeling is one of crucial components in constructing 3D geospatial information. The existing methods for 3D building modeling depend mainly on manual photogrammetric processes, which indeed take great amount of time and efforts. In recent years, many researches on 3D building modeling using aerial LiDAR data have been actively performed to aim at overcoming the limitations of existing 3D building modeling methods. Either techniques with interpolated grid data or data fusion with digital map and images have been investigated in most of existing researches on 3D building modeling with aerial LiDAR data. The paper proposed a method of 3D building modeling with LiDAR data only. Firstly, octree-based segmentation is applied recursively to LiDAR data classified as buildings in 3D space until there are no more LiDAR points to be segmented. Once octree-based segmentation is completed, each segmented patch is thereafter merged together based on its geometric spatial characteristics. Secondly, building model components are created with merged patches. Finally, a 3D building model is generated and composed with building model components. The experimental results with real LiDAR data showed that the proposed method was capable of modeling various types of 3D buildings.

Key Words : LiDAR, Octree, Segmentation, Merge, Modeling, Building model.

요약 : 건물의 3차원 모델링은 3차원 공간정보를 구축하는데 있어서 매우 중요한 요소이다. 기존의 3차원 건물 모델링은 대부분 항공사진측량기술을 이용하여 수동으로 진행되어 많은 시간과 비용이 소요된다. 이러한 한계를 극복하기 위한 방안으로 최근에는 항공라이다(LiDAR) 데이터를 이용한 건물모델링 방법에 대한 많은 연구가 활발히 진행되고 있다. 항공라이다 데이터를 이용한 대부분의 3차원 건물모델링 연구는 보간과정을 통하여 격자구조로 변환하거나 수치지도 또는 항공영상 등의 이종 데이터간의 융합을 통하여 건물을 모델링하는 방안 등을 제시하였다. 본 논문에서는 점 데이터의 격자구조로의 변환 및 이종 데이터간의 융합 등의 방법을 배제하고 항공라이다 데이터만을 이용한 건물의 자동 모델링 방법을 제안하였다. 건물로 분류된 항공라이다 데이터를 옥트리 분할을 기반으로 3차원 공간상에서 재귀적으로 분할하여 패치(patch)를 구성하고, 동일한 속성을 갖는 패치들을 병합하여 건물의 구성요소를 추출한다. 추출되어진 건물의 구성

2008년 3월 31일 접수 ; 2008년 4월 24일 수리.
† 교신저자: 조우석(wcho@inha.ac.kr)

요소를 대표하는 모델을 생성하여 전체적인 건물의 3차원 모델을 구성한다. 항공라이다 데이터를 이용하여 제안된 방법으로 실험한 결과, 다양한 형태의 건물 모델을 자동으로 구성할 수 있었다.

1. 서 론

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 이루어지는 3차원 도화방법은 많은 시간과 비용이 소요되며, 현재까지 제시된 자동화 방법들은 건물을 정확하고 세밀하게 묘사하는데 한계가 있다. 따라서 건물을 3차원 모델링하는데 있어 신속하고 정확하게 재구성하는 자동화 기술이 필요하며 이를 위하여 국내외에서 많은 연구가 수행되고 있다.

LiDAR 데이터는 X, Y, Z 좌표정보를 가지고 있는 수많은 비정규 점군으로 구성된다. 2차원 좌표정보를 픽셀구조로 획득하는 영상 데이터에 비하여 LiDAR 데이터는 3차원 좌표정보를 지닌 점집합으로 획득된다. 따라서 기존의 항공영상을 이용한 수동적인 3차원 도화방법의 한계를 극복할 수 있는 대안으로 떠오르고 있다. 이러한 이유로 LiDAR 데이터를 이용한 모델링 방법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

Lee와 Schenk(2001)는 3차원 인지구조(perceptual organization)를 기반으로 불규칙한 LiDAR 데이터를 분할(segmentation)하여 패치(patch)를 생성하고, 동일 속성의 패치들을 병합한 표면(surface)을 구성하여 다면구조물(polyhedral structure)을 추출하는 방법론을 제시하였다. Alharthy와 Bethel(2004)은 표면의 경사변화를 계산하는 마스크를 적용하여 건물의 지붕면을 찾아내는 방법을 제시하였다. LiDAR 데이터를 보간(interpolation)하여 격자(grid) 구조로 변환하고 마스크를 X, Y 방향에 대해 순차적으로 검색하면서 평면요소, X 방향 경사, Y 방향 경사 등을 계산하였다. Schwalbe (2004)는 LiDAR 데이터를 일정한 면에 투영하여 개략적인 지붕의 형상을 추정한 다음 이를 기반으로 수학적인 매개변수를 구하여, 매개변수에 따라 세밀하게 건물을 모델링하는 방법을 연구하였다. Rottensteiner (2003)는 항공사진과 LiDAR 데이터를 융합하여 건물을 탐색하고, 탐색되어진 건물을 LiDAR 데이터에서 얻어진 DSM(Digital Surface Model)과 항공사진을 이용하여 모델링 하는 방법을 제시하였다. Wang과 Tseng (2004, 2005)은 옥트리(octree) 구조를 기반으로 LiDAR 데이터를 분할하고, 동일한 평면을 구성하는 점들로 병합하여 지형 · 지물을 분할 · 분류하는 방법을 제시하였다.

국내의 경우 김홍식(2005)은 2차원의 사분트리 분할(quadtree segmentation) 기법을 적용하여 LiDAR 데이터로부터 건물지붕을 3차원으로 모델링하는 방법을 제시하였다. 이를 위하여 건물의 유형을 평면(flat), 게이블(gable), 아치(arch)형으로 분류하고 지붕유형별로 모델링 방법을 달리하여 모델링을 수행하였다. 박지혜 (2006)는 수치지도와 LiDAR 데이터를 융합하여 3차원 건물을 모델링하는 방법을 제시하였다. 수치지도의 건물영역 좌표를 이용하여 건물영역에 해당하는 LiDAR 점 데이터를 추출하고, 평면근사를 이용하여 건물의 지붕면을 구성하였다.

Rottensteiner(2003)와 박지혜(2006)의 경우에는 LiDAR 데이터 외에 수치지도와 영상 등의 이종 데이터 간 융합을 통하여 건물 모델링을 수행하였다. 이 경우에는 건물을 모델링하기 위하여 사용된 LiDAR 데이터와 이종 데이터간의 획득시기가 일치하여야 하므로 LiDAR 데이터만을 이용하여 건물모델을 수행하는 경우 보다 응용성이 떨어진다. Alharthy와 Bethel(2004)과 같이 LiDAR 데이터를 보간하여 격자구조의 데이터를 이용하는 경우에는 보간 과정에서 오류가 발생할 수 있으며, 3차원 LiDAR 데이터 특성을 충분히 활용할 수 없다는 단점이 존재한다. Schwalbe(2004)와 김홍식 (2005)은 각각 수학적인 매개변수 그리고 건물의 모양에 따라 건물모델을 제약하면서 모델링을 수행하였다.

이러한 방법은 모델링을 수행하기에 앞서 일반적인 건물에 대한 변수들을 미리 정의하거나 건물의 모양을 미리 판단하여 건물모델을 제약해야한다. Wang과 Tseng (2004, 2005)은 옥트리 공간분할 기법을 기반으로 LiDAR 데이터를 분류하여 3차원 건물모델링이 아닌 지형 · 지물의 분류(classification)에 적용하였다.

본 연구에서는 옥트리 공간분할 기법을 3차원 건물모델링을 목적으로 기존 건물모델링 기법에서 사용되었던 건물모델의 제약 및 격자구조로의 변환 등을 배제하고 LiDAR 데이터만을 이용한 건물의 자동모델링 방법을 연구하였다. 건물지붕의 모양은 평면, 게이블, 다면(polyhedral), 곡면 등 매우 다양하지만 이들을 높이, 경사, 방향 등 동일한 속성을 갖는 영역으로 분할해 보면 모든 건물지붕은 3차원 평면의 조합으로 구성되어 있다고 볼 수 있다. 특히 곡면의 경우에는 컴퓨터상에서 곡면을 디스플레이하는 원리와 같이 연속된 평면의 조합으로 묘사할 수 있다. 이러한 전제하에 본 연구에서는 LiDAR 데이터로부터 3차원 평면의 조합으로 건물모델을 추출하는 방법을 제안하였다. 전체적인 연구 과정은 Lee와 Schenk(2001)가 제시한 3차원 인지구조를 기반으로 Fig. 1과 같이 크게 분할(segmentation) 과정, 병합(merge) 과정, 모델링(modeling) 과정으로 구분하여 수행하였다. 건물 구성면을 추출하는 분할 및 병합과정은 송낙현 외(2007)에서 제시한 옥트리 공간분할을 이용한 건물 구성요소의 추출 기법을 적용하였다.

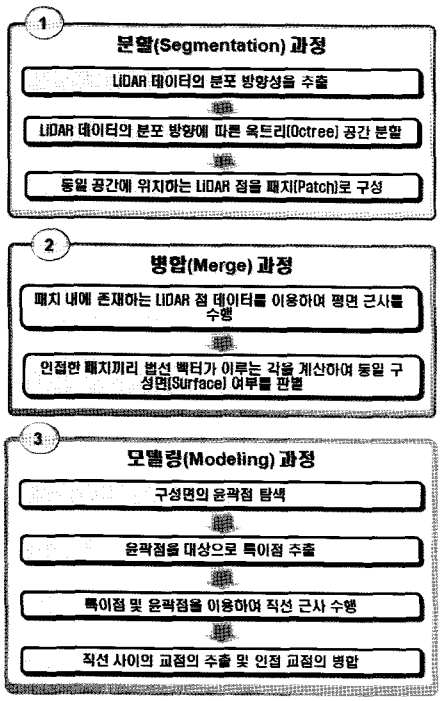


Fig. 1. Research Flow.

2. 분할 및 병합 과정

1) 분할(Segmentation) 과정

분할과정에서는 옥트리 공간분할 기법을 적용하여 LiDAR 데이터를 동일한 특성을 지니는 최소단위인 패치로 구성한다. 패치란 동일한 속성을 갖는 점집합으로 분할된 최소단위의 표면요소를 의미한다(Lee, Schenk, 2001). 본 연구에서는 분할 속도와 분할 정확도를 향상시키기 위하여 건물의 주방향을 추출하고, 주방향에 따라 옥트리 공간분할을 수행한다. 옥트리 공간분할을 수행하면 3차원 공간상에 다수의 직육면체가 구성된다.

분할과정의 기반이 되는 옥트리 공간분할은 3차원 대상공간을 표현하기 위해 옥트리 자료구조를 기반으로 대상공간을 연속적으로 계층화하고 그룹화하여 분할하는 재귀적인 3차원 공간분할방법이다. 즉 직육면체로 정의된 3차원 대상공간을 X, Y, Z축 방향으로 각각 이등분하여 한번에 8개의 직육면체 공간으로 분할하는 과정을 연속적으로 수행함으로써 공간을 세분화하는 방법이다. 옥트리 분할과정에서 생성된 8개의 직육면체공간들은 Fig. 2와 같이 8개의 노드(node)로 분할되는 자료구조(data structure)로 설명할 수 있다.

분할과정은 다음과 같이 4개의 제약조건을 동시에 만족하는 경우에 대해서 재귀적으로 진행된다(Fig. 3).

- 직육면체의 X-Y면적: 다음단계에 분할될 각 직육면체의 X-Y평면상의 면적이 분할될 각 직육면체의 점의 개수로 계산된 최소면적보다 작을 경우 분할을 중단한다. 최소면적은 데이터마다 점밀도를 이용하여 계산되어지며 점밀도란 $1m^2$당 존재하는

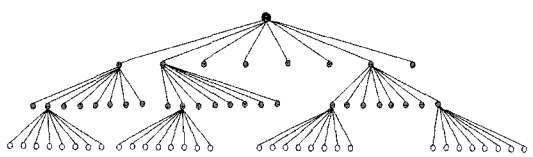


Fig. 2. Data Structure of Octree.

점의 수를 의미한다. 점을 이용하여 면을 구성하기 위해서는 최소 3점을 필요로 하지만 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 사용된다.

- 평면근사의 평균제곱근오차(RMSE): 다음단계에 분할될 직육면체의 점들을 통해 평면방정식을 추정하고, 추정된 평면과 점들간의 거리에 대한 평균제곱근오차가 임계값 보다 작을 경우 분할을 중단한다. 본 연구에서는 LiDAR 시스템의 사양과 촬영고도 및 실험 결과를 바탕으로 임계값을 30cm로 설정하였다.
- 점의 개수: 평면근사(plane fitting)를 위해서 다음단계에 분할될 각 직육면체의 점의 개수가 5점 이하일 경우 분할을 중단한다.
- 점집합의 연속성: 다음단계에 분할될 직육면체에 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 최소거리($\sqrt{5점/점밀도}\ m$)를 갖도록 설정하였다.

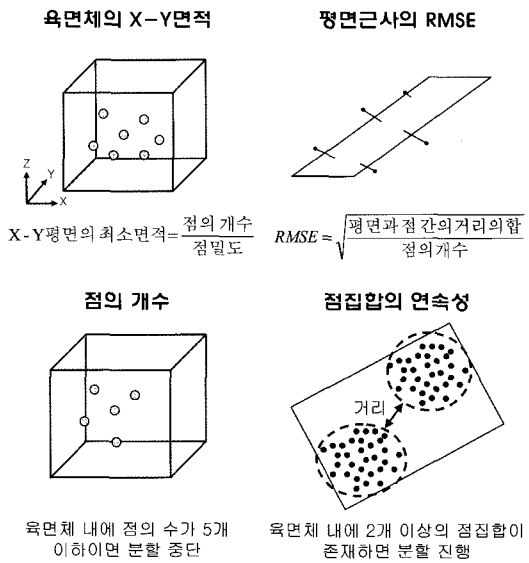


Fig. 3. Constraints on Segmentation.

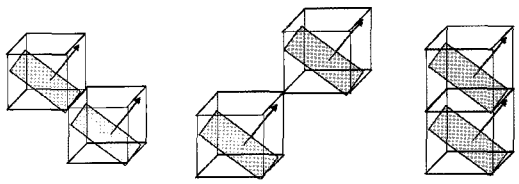
2) 병합(Merge) 과정

병합과정에서는 분할과정을 통하여 획득되어진 패치들을 상호 비교하고 인접한 공간적인 특성을 지닌 패치를 군집화하여 건물 구성면을 구성한다. 각 패치 내에 존재하는 LiDAR 데이터를 이용하여 최적합평면을 추출하고, 인접한 패치의 법선벡터간의 각도차이를 계산하여 패치를 병합한다.

분할과 병합과정에서 필요한 최적합평면을 추정하기 위해서 본 연구에서는 Boggs(1987)에 의해 제안된 ODR (Orthogonal Distance Regression)알고리즘을 적용하였다. 분할과정을 통해 생성된 각각의 패치는 LiDAR 데이터를 기반으로 분할된 공간적인 개념의 최소단위이다. 따라서 건물지붕을 구성하는 3차원 평면요소들을 추출하기 위해서는 동일한 속성을 갖는 패치들을 병합하는 과정이 필요하다. 패치를 병합하기 위해서는 패치들 간의 공간적 특성이 고려되어야 한다. 본 연구에서는 패치의 인접성, 점집합의 연속성, 법선벡터의 비교 등 3가지 제약조건을 순차적으로 적용하여 패치들을 병합하였다.

본 연구에서 패치의 인접성이란 공간적인 인접성 및 논리적인 인접성을 나타낸다. Fig. 4의 (a)와 같이 공간상에서 패치가 인접하고 논리적으로 동일한 평면이라고 인정할 수 있는 경우를 인접한 패치라고 정의한다. 그러나 Fig. 4의 (b)와 같이 공간상에서 패치가 인접하였지만 논리적으로 동일한 평면이라고 인정할 수 없는 가능성이 존재하는 경우는 인접한 패치로 정의하지 않는다.

패치들을 병합하기 위한 또 하나의 제약조건인 패치의 연속성은 각 패치의 점집합들이 3차원 공간상에서 연속적으로 분포되어 있는지를 비교하였다. 즉, 각각의 패치를 구성하고 있는 점집합간의 거리를 Fig. 5에서와 같이 비교하여 거리가 임계거리 이내일 경우 평면근사를 통한 법선벡터의 비교대상 패치로 결정하였다. 즉, 점집합간의 거리가 임계거리를 벗어나는 경우는 패치



(a) 인접한 패치 (b) 인접하지 않은 패치

Fig. 4. Contiguity of Patches.

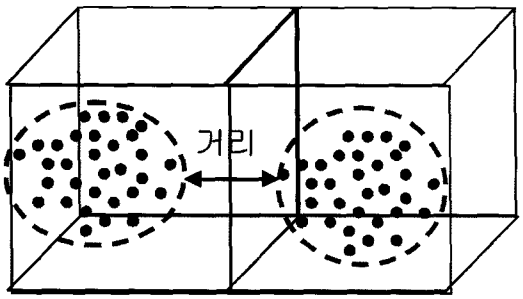


Fig. 5. Continuity of Point Clouds.

간에 인접성이 존재하더라도 연속한 패치로 인정하지 않는다. 임계거리는 분할과정의 제약과정 중 육면체의 X-Y면적 제약조건과 같이 점밀도를 이용하여 계산하며 데이터마다 상대적인 값($\sqrt{5점/점밀도}\ m$)를 이 되도록 설정하였다.

패치의 인접성과 점집합의 연속성을 모두 만족하는 패치들에 대해서만 평면근사를 수행하고 Fig. 6과 같이 각 평면의 법선벡터가 이루는 각을 비교하여 병합여부를 결정한다. Fig. 6에서 점선은 수직오차(Δv)를 포함하지 않는 이상적인 평면을 나타내며, 실선은 각각 L_1과 L_2 길이를 가진 패치에서 실제 데이터를 이용하여 구성되어진 평면을 표현한다. 각각의 패치에서 구성되어진 평면의 법선벡터($\vec{N_1}$, $\vec{N_2}$)가 이루는 각(a_n)은 이상적인 평면과 실제 데이터를 통하여 구성되어진 평면사이의 각(a_1, a_2)의 합을 통하여 구하여진다. 병합여부를 결정하기 위한 법선벡터간의 임계각(a_n)은 식 (1)을 통해 결정하며, 각 평면의 법선벡터가 이루는 각이 임계각 보다 작은 경우에 대해서 병합을 수행한다.

식 (1)에서 확인할 수 있듯이 임계값을 결정하는데 영향을 미치는 변수는 수직오차이다. 허용하는 수직오차에 따라서 패치의 병합여부를 결정한다. 따라서 허용하는 수직오차의 범위에 따라서 결과에 많은 영향이 미치게 된다. 허용하는 수직오차를 엄격하게 적용하면 많은 평면이 생성되어 현실과 다른 건물구성요소를 나타내게 되며, 수직오차를 크게 적용하면 상대적으로 적은 수의 평면이 생성되어 역시 현실과 다른 건물구성을 나타나게 된다. 본 연구에서는 LiDAR 시스템의 사양과 촬영고도 및 실험 결과를 바탕으로 수직오차(30cm)를 결정하였다.

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

L_1, L_2: 육면체의 길이, Δv: 수직오차

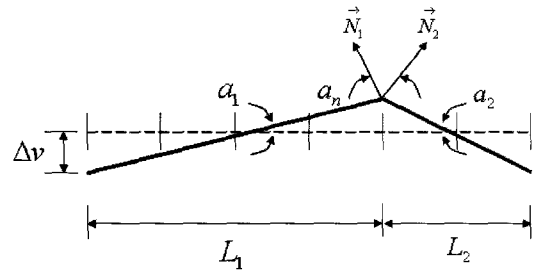


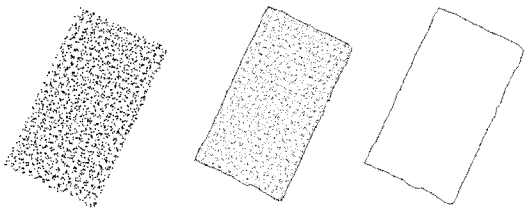
Fig. 6. Normal Vector Analysis.

3. 모델링(Modeling) 과정

모델링 과정에서는 분할 및 병합과정에서 얻어진 개별 건물지붕 구성면을 모델링하고 이를 통합하여 건물의 3차원 모델을 구성한다. 우선 개별 건물지붕 구성면을 이루는 점집합의 최외곽 점인 윤곽점을 추출하고 추출된 윤곽점에서 개별 건물지붕 구성면의 형상을 나타낼 수 있는 특이점을 추출한다. 그러나 LiDAR 데이터의 오차 및 촬영기하 등 다양한 이유로 인하여 추출되어진 특이점이 점집합의 형상을 잘 못 나타내는 경우가 발생할 수 있다. 따라서 추출되어진 특이점과 특이점 사이의 윤곽점 이용하여 직선근사를 수행하고, 근사직선들이 교차하는 교점을 개별 건물지붕 구성면을 나타내는 모델의 정점(vertex)으로 설정한다. 또한 각각 건물지붕 구성면 모델의 정점들을 비교하여 동일한 정점이라고 판단되는 경우에는 이를 조정하여 전체적인 건물의 3차원 모델을 구성한다.

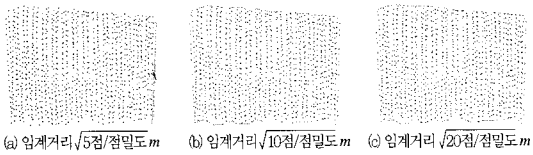
1) 윤곽점 추출

윤곽점이란 Fig. 7과 같이 점집합에서 최외곽에 존재



(a) 점 데이터 군락 (b) 윤곽점으로 이루어진 인케이싱 폴리곤

Fig. 7. Boundary Points and Encasing Polygon.



(a) 임계거리 $\sqrt{5점/점밀도}\,m$ (b) 임계거리 $\sqrt{10점/점밀도}\,m$ (c) 임계거리 $\sqrt{20점/점밀도}\,m$

Fig. 8. Variation of Encasing Polygon due to Threshold Distance.

하는 점을 지칭한다. 본 연구에서는 분할과정과 병합과정을 통하여 얻어진 개별 건물지붕 구성면을 모델링하기 위하여 구성면의 최외각에 존재하는 윤곽점을 추출하였다. 윤곽점의 추출은 이영진(2002)에 의하여 제시된 인케이싱 폴리곤(encasing polygon)제작 알고리즘을 이용하였다.

인케이싱 폴리곤 제작과정은 볼록 깍지(convex hull)를 구성하는 방법과 비슷하지만 윤곽점을 추출하기 위해 설정된 탐색영역의 크기에 따라 상이한 결과를 제공한다. 탐색영역의 크기는 임계거리의 크기에 따라서 결정이 되며, 임계거리가 너무 작으면 Fig. 8의 (a)와 같이 폐합 도형을 이루지 못하게 된다. 반대로 임계거리가 너무 크면 Fig. 8의 (c)와 같이 점 집합의 윤곽점을 정확하게 추출하지 못하는 경우가 발생한다. 본 연구에서는 임계거리로 초기에 $\sqrt{5점/점밀도}\,m$를 적용하고 인케이싱 폴리곤이 폐합이 되지 않거나 탐색되어진 윤곽점이 최대 · 최소 X,Y 좌표를 포함하지 않을 때 임계거리를 증가시키면서 윤곽점을 추출하였다.

2) 특이점 추출

특이점 추출 과정은 Fig. 9와 같이 윤곽점으로 이루

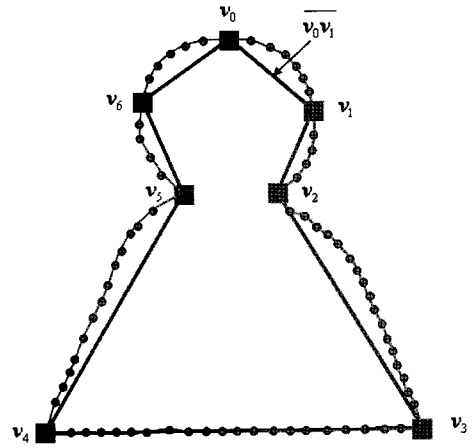


Fig. 9. Boundary Points and Unique Points (Yoon, 2001).

어진 인케이싱 폴리곤의 형상을 대표할 수 있는 특이점을 추출하는 과정이다. 본 연구에서는 윤병주(2001)가 소개한 순환적 정점 선택 기법(Integrated Refinement Method : IRM)을 이용하여 특이점을 추출하였다.

순환적 정점 선택 기법은 근사 직선에서 수직 거리가 가장 먼 윤곽점 까지의 거리를 계산하고 계산되어진 거리가 임계거리(D_{max})보다 크면 그 점을 정점으로 선택하고, 모든 근사 직선에서 윤곽선까지의 수직 거리가 임계거리보다 작을 때 까지 정점을 추가하는 방법이다. 본 연구에서의 임계거리는 $\sqrt{2점/각\ 건물구성면의\ 점밀도}\,m$로서 각 건물구성면의 점밀도에 따라 상대적으로 결정된다. 순환적 정점 선택 기법은 초기 시작점의 선정이 최종적으로 선택되어지는 정점에 영향을 미친다. 본 연구에서는 곡률이 높은 점을 시작점으로 선택한다. 곡률

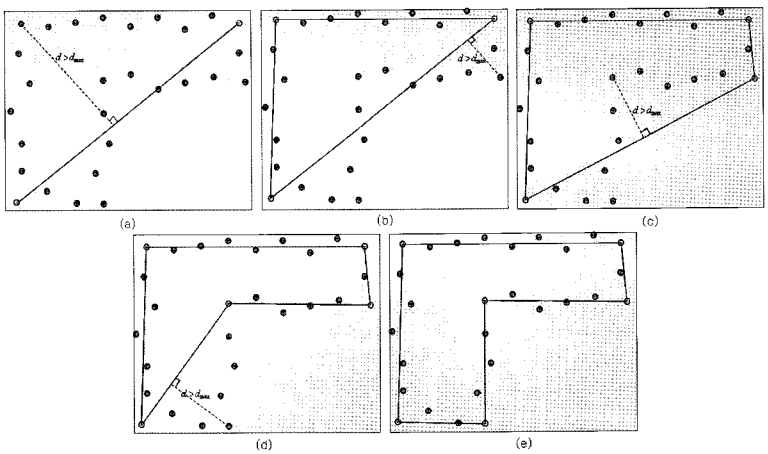


Fig. 10. Process of Integrated Refinement Method.

이 높다는 의미는 하나의 윤곽점과 이웃하는 두 윤곽점이 이루는 내각이 가장 작다는 것을 의미하여 특이점이 될 확률이 가장 높은 점이다. 또한 시작점과 거리가 최대인 점을 선택하여 2번째 정점으로 선택하고 이 두 정점을 연결한 직선과 수직 거리를 계산하여 재귀적으로 정점을 선택한다. 다음의 Fig. 10은 순환적 정점 선택 기법의 수행과정을 설명한다.

3) 정점 추출 및 직각제약

특이점과 특이점 사이에 존재하는 윤곽점을 이용하여 직선근사를 수행하여 근사직선들이 교차하는 교점을 결정한다. 이와 같이 얻어진 교점은 건물지붕 구성면을 이루는 모서리점이라고 볼 수 있으므로 개별 건물지붕 구성면을 나타내는 모델의 정점(vertex)으로 추출한다.

일반적으로 건물과 같은 인공구조물의 모서리는 대부분 직각이 되도록 구성된다. 위와 같은 방법으로 추출된 정점은 LiDAR 데이터의 오차, 촬영기하 및 분할·병합과정의 오류 등 다양한 원인으로 인하여 직각의 모서리임에도 불구하고 직각으로 추출이 되지 못하는 경우가 발생한다. 본 연구에서는 직각 제약조건을 적용하여 근사직선의 교점을 조정하여 보다 실세계에 가까운 지붕형태를 획득하였다. 건물 구성면의 근사직선이 이루는 각도가 $90^\circ \pm 10^\circ$의 경우에 직각 제약조건을 적용하여 건물 구성면 모델의 정점 조정을 수행하였다.

Fig. 11과 같이 두 직선이 이루는 각도가 $90^\circ \pm 10^\circ$ 이내일 경우에 식 (2)는 직선의 방정식으로부터 교점을 구하기 위한 관측방정식이고 식 (3)은 직교 벡터 방정식을 이용하여 조성한 관측방정식이다.

$$\begin{aligned} f_1 &= (y_n + v_{y_n}) - m_{n-1}(x_n + v_{x_n}) - b_{n-1} = 0 \\ f_2 &= (y_n + v_{y_n}) - m_n(x_n + v_{x_n}) - b_n = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

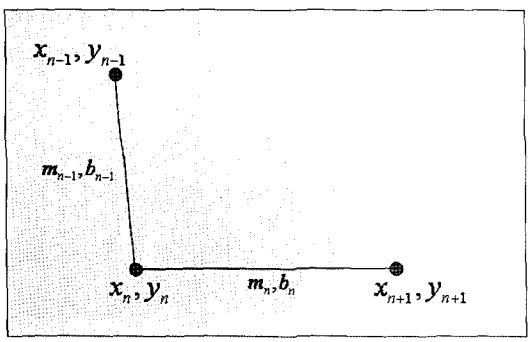
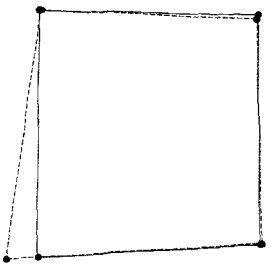


Fig. 11. Two Approximated Lines constrained by Right-Angle Constraint.



파선 : 직각제약조건 적용 전
실선 : 직각제약조건 적용 후

Fig. 12. Outcome of Right-Angle Constraint.

$$f = (x_{n-1} - x_n)(x_{n+1} - x_n) + (y_{n-1} - y_n)(y_{n+1} - y_n) = 0 \quad (3)$$

Fig. 12는 직각제약조건을 적용하여 건물 구성면 모델의 정점을 조정한 결과로서 다각형의 내각이 직각에 가깝게 조정된 것을 보여준다.

4) 인접 건물지붕 구성면 모델의 정점 조정

직각제약조건에 따라 추출된 정점들은 Fig. 13과 같이 인접하여 위치하는 경우가 발생한다. 이와 같이 인접하여 위치한 정점들이 반경 $\sqrt{5점/점밀도}$ m이내에 존재하는 경우 동일한 정점이라고 판단하고, 정점들의 좌표를 평균하여 동일한 좌표의 정점으로 조정한다.

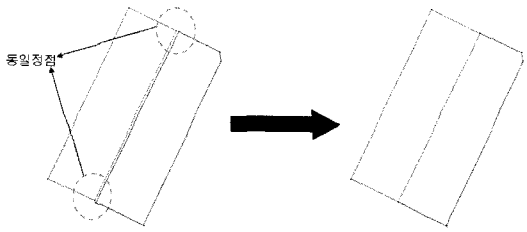


Fig. 13. Search for Corresponding Vertex and Adjustment.

4. 실험결과 및 분석

1) 실험데이터

본 연구에서 사용된 실험데이터는 캐나다 Optech사의 ALTM 30/70을 414.77m의 주사폭으로 1256.92m의 고도에서 1~2 points/m^{2}의 점밀도로 촬영되었다. 실험대상지역은 대전시 일대이며 총 38개의 스트립을 2005년 2월에 3일 동안 걸쳐서 촬영되었다. 실험데이터는 원시 LiDAR 데이터에서 건물로 분류된 first return 데이터만을 이용하였다. 본 연구에서 제안한 건

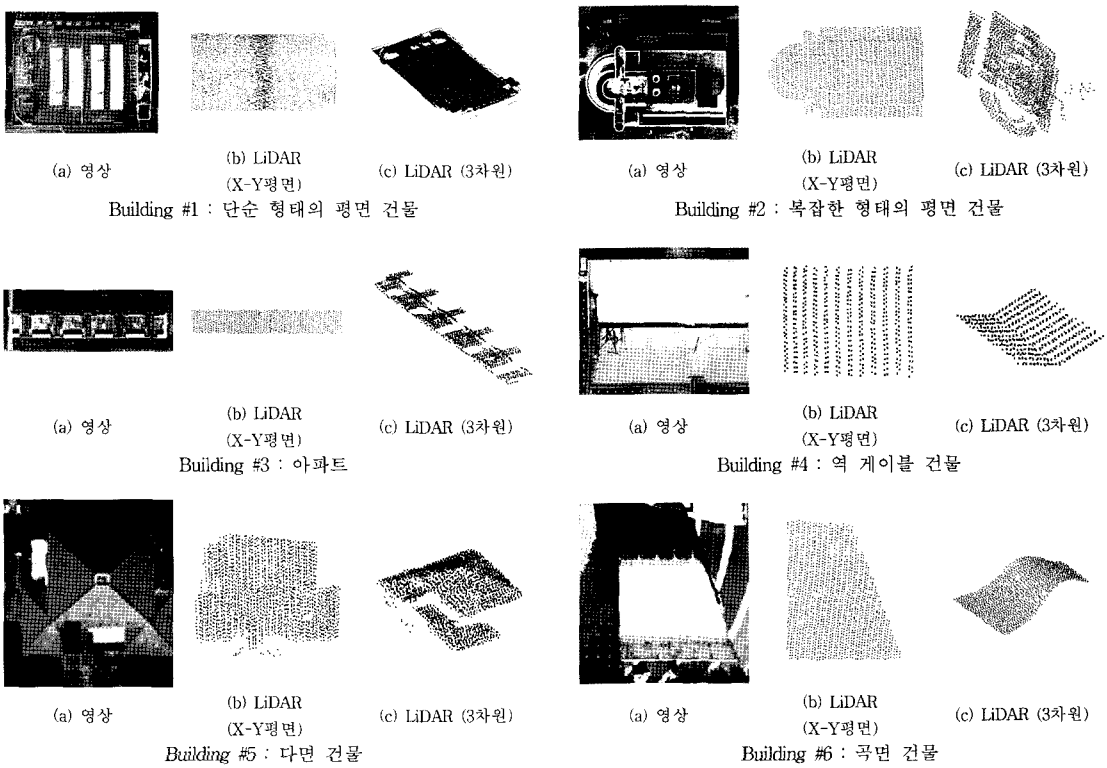


Fig. 14. Building Data for Modeling.

물 모델링 결과를 분석하기 위해서 대상지역내에서 단순 형태의 평면 건물, 복잡한 형태의 평면 건물, 아파트, 역 게이블 건물, 다면형 건물, 곡면형 건물의 6가지 유형의 건물들을 추출하여 실험을 수행하였다. Fig. 14는 실험대상 건물을 나타내는 항공사진영상 및 LiDAR 원시 데이터를 보여준다.

2) 실험결과

본 연구는 건물을 다면 구조체로 정의하고 분할 및 병합 과정을 거쳐서 건물지붕을 구성하는 구성 평면을 추출하였다. 추출되어진 건물지붕 구성면은 모델링 과정을 통하여 3차원 건물모델로 구성하였다. Fig. 15는 분할과정, 병합과정, 모델링과정의 결과를 확인하기 위하여 게이블형태의 지붕에 각 단계별 과정을 적용한 결과이다.

Fig. 16은 실험 대상 건물인 6개 유형의 건물에 각 단계별 과정을 적용하여 최종적으로 획득되어지는 3차원 건물모델을 나타내었다. 건물의 옆면은 제작되어진 건물모델의 정점에서 지상까지의 선을 내려서 구성되는

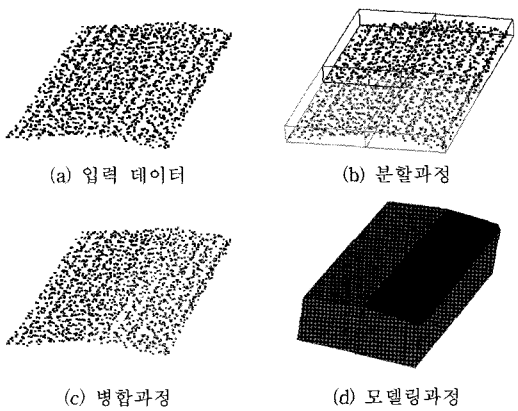
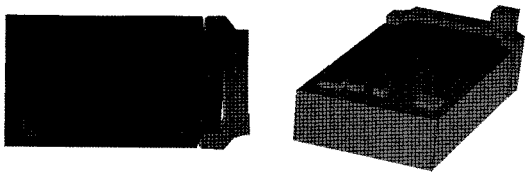


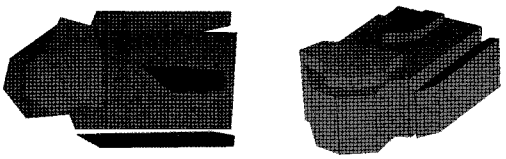
Fig. 15. Stepwise Process of Gable-Roof Modeling.

다각형으로 표현하였다.

Building #1,#3의 경우는 실세계에서 비교적 쉽게 찾아볼 수 있는 단순 다각형으로 이루어진 평면건물이다. 이러한 경우 LiDAR 데이터를 이용하여 3차원 건물모델을 비교적 정확하게 구성하는 것을 확인할 수 있다. 반면에 Building #2의 경우는 곡면이 포함된 다각형 건물 형태로 실세계에 흔하게 존재하지 않는 건물형태이

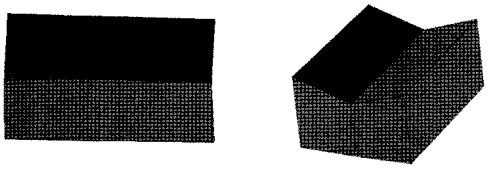


(a) 건물모델(XY 평면) (b) 건물모델 (3차원)
Building #1의 3차원 모델링 결과

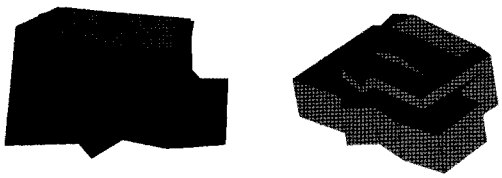


(a) 건물모델(XY 평면) (b) 건물모델 (3차원)
Building #2의 3차원 모델링 결과

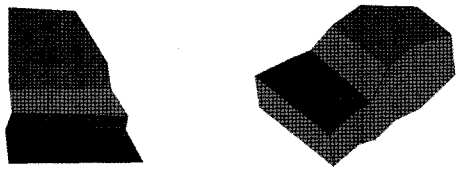
(a) 건물모델(XY 평면) (b) 건물모델 (3차원)
Building #3의 3차원 모델링 결과



(a) 건물모델(XY 평면) (b) 건물모델 (3차원)
Building #4의 3차원 모델링 결과



(a) 건물모델(XY 평면) (b) 건물모델 (3차원)
Building #5의 3차원 모델링 결과



(a) 건물모델(XY 평면) (b) 건물모델 (3차원)
Building #6의 3차원 모델링 결과

Fig. 16. Experimental Results of Building Modeling.

다. 본 연구에서 모델을 구성하는 방법은 윤곽점 및 특이점을 이용한 직선근사이기 때문에 곡선이 직선의 조합으로 표현되는 것을 확인할 수 있다. 특이점을 추출하는 임계값인 점밀도에 의하여 상대적으로 구성되기 때문에 점밀도가 높은 데이터를 사용하면 곡선을 좀 더 부드럽게 표현할 수 있을 것이라고 판단된다.

Building #4는 실세계에 흔히 존재하지 않는 형태인 역 게이블 형태의 건물이지만 게이블 형태의 지붕과 모델링 과정이 크게 다르지 않기 때문에 게이블 형태의 건물의 모델링 결과도 같다고 생각할 수 있다. 구성되어진 건물모델이 건물을 구성하는 2개의 면을 정확히 표현하고 있음을 확인할 수 있다. 반면에 Building #5의 경우는 4개의 경사면으로 구성된 사각뿔형태의 지붕과 주변의 층이 다른 여러 평면으로 조합된 복합다면구조물이다. 구성되어진 건물 모델에서 사각뿔 형태의 건물 구성면에서 4개의 면이 추출된 것을 확인할 수 있으나, 분할과정에서 X-Y, X-Z, Y-Z 평면상에서 공간을 직각사각형 단위로 분할하기 때문에 사각뿔의 첨두 부분에서 정확한 평면요소를 추출하는데 한계가 있다는 것을 확인할 수 있다.

Building #6의 경우는 곡면건물로서 곡면이 평면의 조합으로 표현되는 것을 확인할 수 있다. 법선 벡터를 비교하여 병합과정을 거치기 때문에 경사변화가 작은 곳은 넓은 간격으로, 경사변화가 큰 곳은 좁은 간격으로 평면이 추출되어 모델링이 되었다.

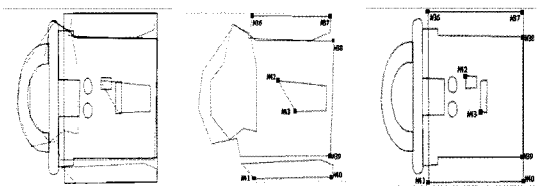
3) 평가 및 분석

본 연구에서의 제안한 방법으로 구성한 3차원 건물모델의 정량적 평가를 위하여 동일 건물의 수치도화 데이터와의 비교를 수행하였다. 비교분석에 사용된 수치도화데이터는 DMC 디지털카메라로 촬영된 수치영상을 수치사진측량시스템을 이용하여 도화사에 의해 제작되었다.

정량적 평가는 수치도화 데이터를 기준으로 하여 수치도화 데이터와 LiDAR 데이터로부터 구성되어진 3차원 건물모델에서 동일하다고 판단되는 정점의 위치를 비교하였다. 다음의 Fig. 17은 수치도화 데이터와 건물모델링 데이터에서 동일한 정점을 나타내었다.

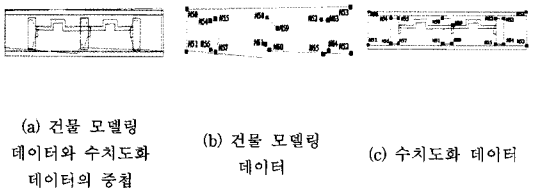
(a) 건물 모델링 데이터와 수치도화 데이터의 중첩 (b) 건물 모델링 데이터 (c) 수치도화 데이터

정점의 분포 (Building #1)



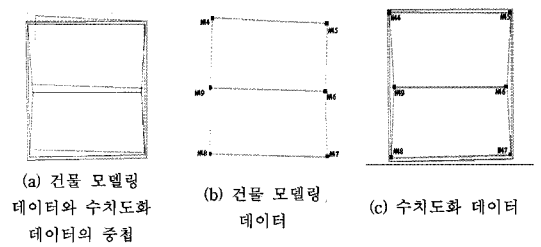
(a) 건물 모델링 데이터와 수치도화 데이터의 중첩 (b) 건물 모델링 데이터 (c) 수치도화 데이터

정점의 분포 (Building #2)



(a) 건물 모델링 데이터와 수치도화 데이터의 중첩 (b) 건물 모델링 데이터 (c) 수치도화 데이터

정점의 분포 (Building #3)



(a) 건물 모델링 데이터와 수치도화 데이터의 중첩 (b) 건물 모델링 데이터 (c) 수치도화 데이터

정점의 분포 (Building #4)

Fig. 17. Check Points for Quantitative Evaluation.

일반적으로 LiDAR 시스템이 갖고있는 위치오차는 고도에 따라서 상대적으로 결정된다. 본 연구에서 사용한 LiDAR 데이터의 위치오차는 대략 수평오차 0.61m, 수직오차 0.15m이다. 수치도화 데이터를 기준으로 본 연구에서의 제안한 방법으로 구성한 3차원 건물모델과 비교한 결과 건물모델의 수평위치 평균제곱근오차와 수직위치 평균제곱근오차는 각각 1.01m, 0.53m로 나타났다.

본 연구에서 제안한 방법으로 구성된 3차원 건물모델은 수치도화와 비교하여 상대적으로 큰 위치오차를 갖고 있으며, 단순한 건물을 제외하고는 실세계의 3차원 건물을 자세하게 구성하는 데 한계를 보여주었다. 그 이유는 크게 두 가지로 첫째는 본 연구에 사용한 LiDAR 데이터의 점밀도, 촬영기하 및 폐색 등의 데이터 취득시의 요인이며 둘째는 본 연구에서 제안한 알고리즘의 한계이다.

Building #2,#3,#5,#6의 경우와 같이 1~2 points/m^2의 점밀도로는 실세계 건물을 자세하게 묘사하는 데 한계가 있으며, 특히 Building #2,#3,#5의 경우와 같이 촬영기하와 폐색 등의 이유로 인하여 LiDAR 데이터가 존재하지 않는 경우에는 거의 불가능하다. 또 다른 요인으로는 LiDAR 데이터의 특성을 반영하지 않고 동일한 육면체의 크기로 공간을 분할하는 옥트리 공간분할이다. Fig. 18에서 보여지는 것처럼 3차원 대상공간을

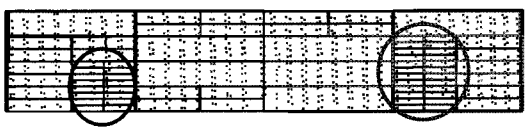


Fig. 18. Problematic Area in Segmentation.

LiDAR 데이터의 특성을 반영하지 않고 동일한 직육면체의 크기로 공간을 분할하므로 각 패치를 구성하는 점의 숫자가 상대적으로 적어 병합과정에서 제외되는 경우이다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해서는 LiDAR 데이터의 분포에 따라서 공간을 분할할 수 있도록 옥트리 공간분할 알고리즘이 개선되어야 한다.

5. 결 론

본 연구에서는 옥트리 공간분할 기법을 3차원 건물모델링을 목적으로 기존 건물모델링 기법에서 사용되었던 건물모델의 제약 및 격자구조로의 변환 등을 배제하고 LiDAR 데이터만을 이용한 건물의 자동모델링 방법을 연구하였다. 건물을 3차원 평면의 조합으로 구성된 다면구조체로 가정하고, 건물을 구성하고 있는 건물 구성면을 추출하기 위하여 분할 · 병합과정을 적용하였으며, 추출되어진 건물 구성면에 모델링과정을 적용하여 3차원 건물모델을 구성하였다.

분할과정에서는 옥트리 공간분할을 기반으로 3차원 공간상에 존재하는 LiDAR 데이터를 공통적인 특징을 지니고 있는 최소단위인 패치로 구성하였다. 병합과정에서는 패치의 인접성, 점집합의 연속성 및 인접한 패치들의 법선벡터의 비교 등 3가지 제약조건을 순차적으로 적용하여 건물구성면을 추출하였다. 모델링과정에서는 건물구성면 각각의 모델을 추출하고 이를 통합하여 3차원 건물모델을 추출하였다. 수치도화 데이터를 기준으로 항공 LiDAR 데이터만을 이용하여 구성된 3차원 건물모델과 위치정확도를 비교한 결과 건물모델의 수평위치 평균제곱근오차와 수직위치 평균제곱근오차는 각각 1.01m, 0.53m로 나타났다. 또한 LiDAR 데이터의 점밀도, 촬영기하 및 폐색 등의 데이터 취득시의 요인으로 인하여 단순한 건물을 제외하고는 실세계의 3차원 건물을 자세하게 구성하는 데 한계를 보여주었다.

결론적으로 항공 LiDAR 데이터만을 이용하여 3차원 건물을 모델링하기 위해서는 높은 점밀도가 필요하며 실세계의 건물을 자세하게 모델링하기 위해서는 폐색 등이 발생하지 않도록 촬영이 이루어져야 한다. 또한 본 연구에서 적용한 옥트리기반의 공간분할 과정을 LiDAR 데이터의 특징과 분포에 따라 신축적으로 분할할 수 있도록 후속 연구가 추가적으로 필요하다. 마지막으로 현실세계에 존재하는 건물들의 특성인 직교성, 평행성 등의 일반적인 특성을 적용하면 보다 현실세계에 적합한 건물모델을 구성할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 첨단도시기술개발사업 - 지능형국토정보기술혁신 사업과제의 연구비지원(07국토정보C03#)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

김홍식, 2005. 라이다에 의한 지붕유형의 자동분류와 모델링, 인하대학교 석사학위 논문, pp. 16-28.

박지혜, 2006. LiDAR 데이터와 수치지도를 융합한 건물 모델링, 서울시립대학교 석사학위 논문, pp. 22-36.

송낙현 외, 2007. LiDAR 데이터를 이용한 옥트리 분할 기반의 지붕요소 자동추출, 한국측량학회지, 25(4): 327-336.

윤병주, 2001. 윤곽선 정보 감축을 위한 곡률 기반 정점 선택, 한국과학기술원 박사학위 논문, pp. 28-31.

이영진, 2003. LiDAR 데이터와 항공사진을 이용한 건물의 자동추출에 관한 연구, 인하대학교 석사학위 논문, pp. 14-17.

Abdullatif Alharthy and James Bethel, 2004, Detailed building reconstruction from airborne laser data using a moving surface method, *International Society of Photogrammetry and Remote Sensing*, Istanbul, Turkey, July. 12-23, 2004, Commission III.

Ellen Schwalbe, 2004, 3D building model generation from airborne laser scanner data by straight line detection in specific orthogonal projections, *International Society of Photogrammetry and Remote Sensing*, Istanbul, Turkey, July. 12-23, 2004, Commission Ⅲ

F. Rottensteiner, J. Trinder, S. Clode, and K. Kubik, 2005, Automated Delineation of Roof Planes from LIDAR Data, *International Society of Photogrammetry and Remote Sensing*, Enschede, Netherlands, Sep. 12-14., 2005

Impyeong Lee and Toni Schenk, 2001, 3D Perceptual Organization of Laser Altimetry Data, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Annapolis, MD, Oct. 22-24 2004. Volume XXXIV-3/W4 Commission III.

Miao Wang and Yi-Hsing Tseng, 2004, Lidar data segmentation and classification based on octree structure, *International Society of Photogrammetry and Remote Sensing*, Istanbul, Turkey, July 12-23. Commission III.

Miao Wang and Yi-Hsing Tseng, 2005, Automatic Plane Extraction from LiDAR Data Based on Octree Splitting and Merging Segmentation,

International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Seoul, Korea, July 25-29. Vol. 5

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.