

지상 라이다를 이용한 건물의 정밀 모델링 Precise Modeling of Buildings Using a Terrestrial LIDAR

이임평¹⁾, 최윤수²⁾, 사석재³⁾, 오의종⁴⁾
Impyeong Lee, Yunsoo Choi, Seokjae Sa, Euijong Oh

- ¹⁾ 서울시립대학교 지적정보학과 교수 (E-mail : iplee@uos.ac.kr)
²⁾ 서울시립대학교 지적정보학과 교수 (E-mail : choiys@uos.ac.kr)
³⁾ 서울시립대학교 지적정보학과 석사과정 (E-mail : seokjae4@uos.ac.kr)
⁴⁾ 서울시립대학교 지적정보학과 석사과정 (E-mail : gps@uos.ac.kr)

Abstract

As the applications of 3D GIS rapidly increase, the need for acquisition and continuous update of urban models is increasingly emphasized. Particularly, building models has been considered as the most crucial component of urban models. Many researchers thus have focused on building extraction from mainly aerial photos or airborne LIDAR data but so far mostly failed to achieve satisfactory results in terms of both completeness and precision because of the intrinsic limitation of the sensory data themselves. Therefore, instead of the airborne sensors, we utilize a terrestrial LIDAR to generate precise and complete building models. This paper presents the overview of the sensors for data acquisition, describes data processing methods for building modelling from the acquired data and summarizes the experimental results.

1. 서 론

차세대 첨단 주력산업으로 주목받고 있는 텔레메틱스(telematics), 위치정보서비스(location based service, LBS), 유비쿼터스(ubiquitous) 등의 발전과 더불어 3차원 지리정보시스템(GIS)의 활용은 급격히 증가할 것으로 기대된다. 특히 도시모델은 이러한 3D GIS의 근간을 이루며, 이에 도시모델의 획득과 지속적인 수정에 대한 수요의 증가도 필연적이다. 이러한 도시모델은 건물과 도로와 같은 인공구조물의 모델을 필수적인 요소로 포함하고 이에 따라 그러한 모델을 센서 데이터로부터 자동 또는 반자동으로 생성하는 연구들이 많이 진행되어왔다.

건물 모델링을 위한 기존의 연구(Halla and Brenner, 1999; Maas and Vosselman, 1999; Jung, 2004; Suveg and Vosselman, 2004)들은 주로 항공 영상 또는 라이다 데이터와 같은 항공용 센서와 같은 원거리 센서의 데이터를 입력으로 사용하였다. 원거리 센서는 데이터 획득에 소모되는 비용이나 시간이 작다는 장점이 있지만, 고정밀의 모델링을 위한 고해상도 데이터를 제공하기 어렵다는 단점이 있다. 이로 인해 이러한 원거리 데이터를 기반으로 하는 기존의 많은 연구들은 센서 데이터 자체의 한계로 인해 완전하고 정밀한 모델을 추출하는데 있어서 만족할만한 결과를 생성하지 못했다.

이에 따라 본 연구는 기존의 항공용 센서보다 더 조밀하고 정밀한 3차원 좌표를 생성하는 지상 라이다를 이용하여 건물의 모델링을 수행하였다. 본 논문은 먼저 데이터 획득에 관련 사항들을 간략히 소개하고, 데이터 정합 및 모델링으로 구성되는 데이터 처리 방법을 기술하며, 이러한 방법을 적용한 실측 데이터에 적용한 결과를 요약한다.

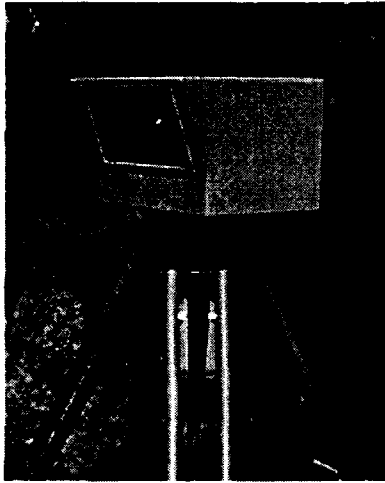
2. 데이터 획득

2.1 센서의 소개 및 역할

건물의 정밀 모델링을 위해 지상 라이더, total station, 디지털카메라를 사용하였다. 지상 라이더는 건물의 표면으로부터 조밀한 3차원 좌표를 획득하고, total station은 획득된 좌표를 절대좌표로 변환하기 위한 기준점의 절대좌표를 측량하고, 디지털카메라는 지상 라이더 데이터로부터 추출된 다면체 모델의 각각의 면에 텍스처(texture)를 입히기 위한 건물의 영상데이터를 획득한다.

2.1.1 지상 라이더 (모델명: ILRIS-3D)

Optech사의 ILRIS-3D를 사용하였다. 이 모델의 사진과 주요 규격은 그림1과 같다. 규격에서 개개의 레이저펄스가 표적에 반사될 때 이루는 스팟(spot)의 크기와 간격이 상당히 작고 또한 데이터 샘플링 속도가 빠르기 때문에 고속 정밀 샘플링을 수행할 수 있다는 장점이 있다.



(a)

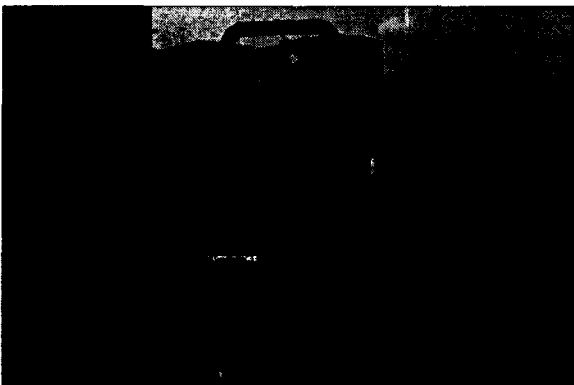
Maximum range	To 4% target	350m
	To 20% target	800m
Range resolution	1cm	
Spot size	@50m	15mm
	@100m	20mm
Spot spacing	@50m	<10mm
	@100m	20mm
Spot position accuracy	X-Y @50m	±7mm
	X-Y @100m	±10mm
	Z @50m	±10mm
	Z @100m	±10mm
Field of view	40° (±20°)	
Data sample rate	2,000 point per sec	

(b)

그림 1. 지상 라이더(모델명: ILRIS-3D)의 (a) 사진 및(b) 규격

2.1.2 Total Station (Geodimeter 620M)

Geodimeter 620M을 사용하였다. 이 모델의 사진과 주요 규격은 그림2와 같다.



(a)

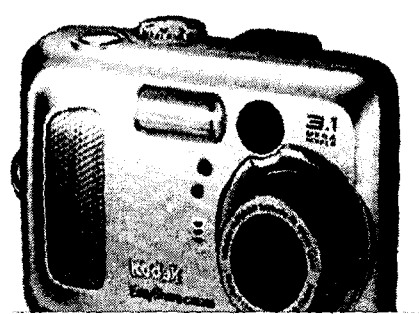
구분		일반형 (620M)	
측정정밀도		2"	
측정단위		1"	
거리 측정	프 리 즘	1개	최대 3.5km
		2개	최대 4.5km
		3개	최대 5.8km
측정단위		1mm	
정밀도		2mm + 2ppm	
일 반 사 항	자동보정		±6분 범위 양측보정
	만 원 경	배율	30×
		초점	0.2m ~ 무한
구경		45mm(EDM 50mm)	

(b)

그림 2. Total station(모델명: Geodimeter 620M)의 (a) 사진과 (b) 규격

2.1.3 디지털 카메라 (KODAK CX6330)

KODAK CX6330을 사용하였다. 이 모델의 사진과 주요 규격은 그림3과 같다.



구분	내용
CCD 해상도	3.3 메가픽셀(2041x1560 픽셀)
이미지 해상도	3.1 메가픽셀(2032x1524 픽셀)
줌	10배
	3배 광학 줌, 37 mm - 111 mm
	3.3배 고급 디지털 줌
초점 / 자동 초점	향상된 저조명 성능의 다중 영역 AF
초점 거리	0.6 m(2 ft.) - 무한대
셔터 속도	1/2-1/1400초
조리개	f/2.7-5.2(광각), f/4.6-8.7(망원)

(a)

(b)

그림 3. Digital Camera(모델명: KODAK CX6330)의 (a) 사진과 (b) 규격

2.2 시험 지역

서울시립대학교의 21세기관은 외관이 평이하지 않고 복잡하고 재미있는 모습을 가지고 있다. 그림 4에서와 같이 북측 건물의 모양과 남측 건물의 모양이 완전히 다른 건물인 듯 하다. 서편에서 남측의 건물과 북측의 건물이 연결이 되어있다. 그리고 서편에서 보면 6층 건물, 다른 면에서 보면 7층 건물의 모습을 가지고 있다.



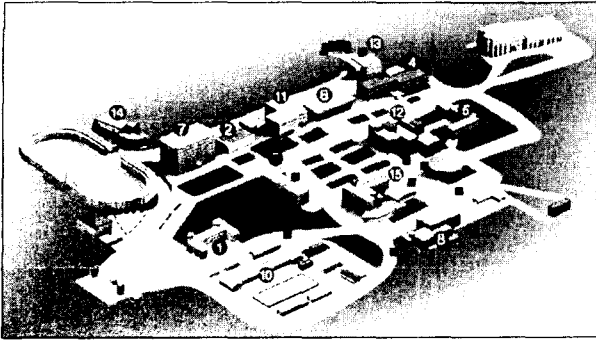
(a)

(b)

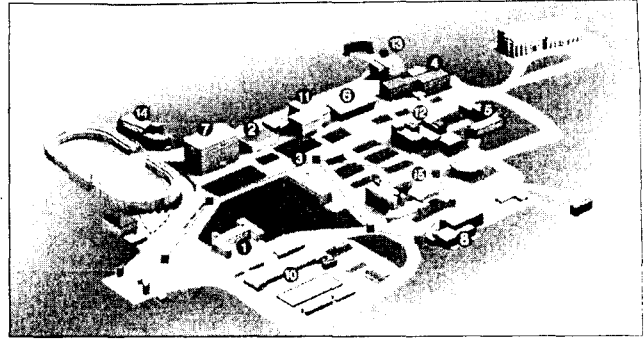
그림 4. 시험 대상 건물: 서울시립대학교 21세기관 (a) 북측면 (b) 동측면

2.3 획득 방법

그림 5(a)에서 표시된 것처럼 시험 대상 건물인 21세기관(15번 빌딩)의 주변에서 건물의 측면과 지붕면이 잘 보이는 10개의 지점을 선택하고 각각의 위치에서 지상 라이더를 위치하여 스캐닝을 통해 조밀한 3차원 좌표를 획득하고 또한 동일한 위치에서 디지털 카메라로 여러 개의 사진을 획득하였다. 10개의 지점에서 획득한 라이더 데이터 셋을 나중에 정합하기 위해서 인접한 두 개의 데이터 셋에서 동시에 식별이 가능한 공통점을 적어도 3개 이상씩 확보해야한다. 이러한 공통점은 프리즘 셋을 지상 위에 세워서 인위적으로 구성하였고, 각각의 공통점의 정확한 3차원 절대 좌표를 그림 5(b)에 표시된 21세기관 주변의 기준점에 근거하여 total station을 이용하여 독립적으로 획득하였다.



(a)



(b)

그림 5. (a) 지상 라이다의 스캐닝 위치 (b) 기준점의 현황

2.4 획득 결과

지상 라이다 측량으로 획득된 데이터의 특성은 표 1에 요약되어 있다. 라이다의 위치에서 건물까지의 거리는 대략 40-80 m를 이루고 건물 표면에서 약 6 cm 간격으로 샘플링을 수행하였고 각각의 데이터 셋은 수십만 개의 점의 3차원 좌표값으로 구성된다. Outlier의 비율은 대략 1-10% 정도로 파악되었다.

표 1. 지상 라이다 측량으로 획득된 데이터의 특성

File ID	Size [MB]	Average range[m]	Average spacing[cm]	Input shots	Output shots	Outlier ratio[%]
1	5.3	81	6	475996	450596	9.1
2	4.0	55	6	341120	313937	3.6
3	3.1	49	6	249090	226803	5.1
4	3.0	51	6	237208	216910	5.0
5	2.5	36	6	191394	172066	1.3
6	2.5	39	6	190440	169326	1.4
7	2.7	44	6	208624	184552	1.7
8	2.9	42	6	230364	206190	4.0
9	4.1	61	6	353790	328342	2.6
10	4.5	61	6	395622	367164	3.5

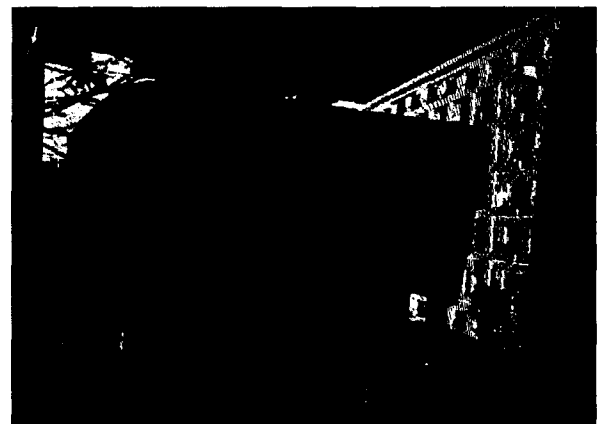
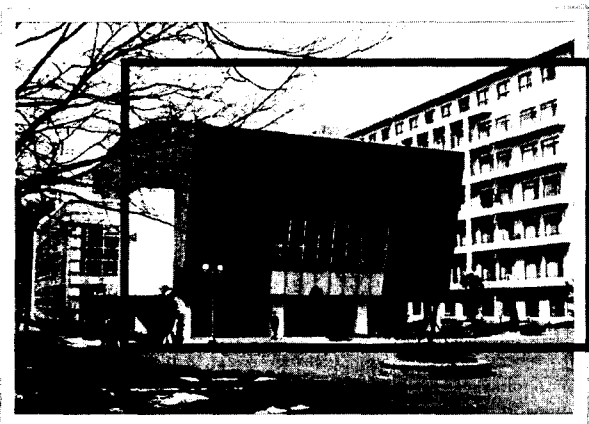


그림 6. (a) 지상 라이다의 스캐닝 위치 (b) 기준점의 현황

3. 데이터 처리 방법

건물의 정밀 모델링을 위해 획득한 데이터를 처리하는 방법은 크게 여러 위치에서 획득한 라이다 데이터를 하나의 공통된 좌표계로 변환하는 “데이터 정합”과 변환된 데이터로부터 건물의 CAD 모델을 추출하는 “모델링”으로 구성된다.

3.1 데이터 정합(Registration)

데이터 정합(registration)은 여러 위치에서 획득하여 각각의 독립된 좌표계로 표현된 라이다 데이터를 좌표 변환하여 하나의 공통된 좌표계로 표현하는 것이다. 정합의 방법은 크게 “독립적 정합”과 “종속적 정합”으로 분류할 수 있다. 독립적 정합은 각각의 데이터 셋을 total station 데이터에 근거하여 개별적으로 절대 좌표계로 변환하여 하나의 통일된 좌표계로 표현하는 방법이다. 정합의 정확도는 높지만 total station 데이터가 많이 요구된다는 장점이 있다. 이에 비해, 종속적 정합은 일단 하나의 데이터 셋의 좌표계로 다른 모든 데이터 셋을 변환하고 변환된 데이터 셋을 total station 데이터에 근거하여 절대 좌표계로 변환한다. 상대적으로 total station 데이터가 적게 요구되지만 정합의 정확도가 떨어질 가능성이 있다.

데이터 정합은 결국 하나의 좌표계로 표현된 데이터 셋을 모든 데이터가 공유하는 하나의 공통 좌표계로 변환하는 과정을 포함한다. 이 과정은 두 좌표계 사이의 관계를 설정하고 설정된 관계에 근거하여 데이터의 좌표 변환을 수행한다. 두 좌표계 사이의 관계는 좌표계 사이의 회전과 이동을 나타내는 변수의 결정을 통해 수립되며 이는 하나의 좌표계를 적절한 만큼의 회전과 이동을 수행하면 두 번째 좌표계와 정확하게 일치시킬 수 있다는 것에 근거한다. 설정된 관계에 근거한 좌표 변환은 식(1)로 수행된다. 여기서, 좌표계 A로 표현된 한 점의 좌표 $p_A = [x_A, y_A, z_A]^T$ 는 (ω, ϕ, χ) 로 표현된 회전과 $t = [t_x, t_y, t_z]^T$ 로 표현된 이동을 통해 좌표계 B로 표현된 좌표 $p_B = [x_B, y_B, z_B]^T$ 로 변환된다.

$$p_B = R p_A + t \quad (1)$$

$$R \doteq \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \chi & -\sin \chi \\ 0 & \sin \chi & \cos \chi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \phi & 0 & \sin \phi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \phi & 0 & \cos \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \omega & -\sin \omega & 0 \\ \sin \omega & \cos \omega & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

식(1)과 (2)에서 포함된 6개의 회전과 이동을 나타내는 변수는 두 개의 데이터 셋에서 conjugate pair에 근거하여 추정한다. 여기서 conjugate pair는 두 개의 데이터 셋에서 실제로 동일한 점을 나타내는 점의 쌍을 의미한다. 식(2)의 R은 초기근사값 R_0 와 미세변화값 ΔR 에 의해 식(3)처럼 표현된다.

$$R = (I_3 + \Delta R) \cdot R_0 \quad (3)$$

$$\Delta R \doteq \begin{bmatrix} 0 & -\omega & \phi \\ \omega & 0 & -\chi \\ -\phi & \chi & 0 \end{bmatrix}, \quad I_3 \doteq \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

식(3)을 식(1)에 넣어 정리하면 아래 식(5)를 얻을 수 있다.

$$p_B - R_0 p_A = \Delta R R_0 p_A + t \quad (5)$$

식(5)를 풀어서 정리하면 식(6)을 얻을 수 있다.

$$p_B - R_0 p_A = \begin{bmatrix} -u_y & u_z & 0 & 1 & 0 & 0 \\ u_x & 0 & -u_z & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -u_x & u_y & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega \\ \phi \\ x \\ t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$[u_x, u_y, u_z]^T = R_0 p_A \quad (7)$$

식(6)에 포함된 6개의 미지수를 결정하기 위해 식(8)과 같은 Gauss-Markov 모델을 설정할 수 있다. 여기서 e_i 는 관측치 y_i 에 수반된 오차이다.

$$y_i = A_i \xi + e_i, \quad e_i \sim (0, \sigma_0^2 I_3) \quad (8)$$

$$y_i = p_B - R_0 p_A, \quad A_i = \begin{bmatrix} -u_y & u_z & 0 & 1 & 0 & 0 \\ u_x & 0 & -u_z & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -u_x & u_y & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \xi = \begin{bmatrix} \omega \\ \phi \\ x \\ t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} \quad (9)$$

이와 같이 기본적으로 하나의 conjugate pair는 3개의 식을 생성하고 미지수는 6개가 있기 때문에 오차의 영향을 줄이기 위해서 적어도 3개의 conjugate pair가 필요하다. 만약 n 개의 conjugate pair가 주어진다면, 각각 conjugate pair로부터 설정된 식(8)과 같은 모델을 조합해서 식(10)과 같은 Gauss-Markov 모델을 설정할 수 있다.

$$y = A\xi + e, \quad e \sim (0, \sigma_0^2 I_{3n}) \quad (10)$$

$$y = [y_1, y_2, \dots, y_n]^T, \quad A = [A_1, A_2, \dots, A_n]^T, \quad e = [e_1, e_2, \dots, e_n]^T \quad (11)$$

최소제곱법에 기반하여 식(10)으로부터 식(12)처럼 추정치를 계산할 수 있다.

$$\xi = (A^T A)^{-1} A^T y \quad (12)$$

위의 추정치를 기반으로 초기근사값 R_0 을 다시 계산하고 이를 바탕으로 식(10)의 모델을 다시 수립하여 추정치를 계산하는 과정을 추정치가 수렴할 때까지 반복한다.

3.2 모델링

모델링은 데이터 정합을 통해 하나의 공통된 좌표계로 변환된 데이터, 즉, 3차원 공간에 구름처럼 존재하는 점들의 집합으로부터 건물의 정밀한 CAD 모델을 추출하는 것이다. 이 과정은 크게 점들의 집합으로부터 평면 패치를 분할(segmentation)하고, 분할된 평면패치와 이를 통해 추론한 가장자리와 구석점을 그룹핑(grouping)하여 건물의 다면체 모델을 형성한다. 이 과정에서 특히 분할 및 그룹핑 과정은 기본적으로 저자가 수행한 이전의 연구(Lee and Schenk, 2001a; Lee and Schenk, 2001b; Lee and Schenk, 2002; Lee, 2002)로 개발한 인지적 구성(perceptual organization) 과정에 기반한다. 여기서는 제안된 방법의 개념적이고 이론적인 측면만을 소개한다. 논문의 길이에 제한되어 수학 및 알고리즘 측면은 의도적으로 생략하였고 보다 자세한 내용은 Lee (2002)의 연구를 참고하도록 한다.

3.2.1 평면패치의 분할

점들로 부터 평면패치를 분할하는 과정은 점들 사이의 인접성(adjacency)을 설정하고, 종자패치(seed patch)들을 선택하고, 종자패치들로부터 평면패치를 성장시키고, 마지막으로 표면경계(surface boundary)를 계산하는 것으로 이루어진다. 각각의 평면패치는 패치를 구성하는 내부점, 내부점에 근사된 평면모델의 계수, 근사의 오차와 표면경계로 명시된다.

(1) 점의 인접성의 설정: 점들간의 상호적인 인접성은 점사이의 간격에 의거하여, 간격이 주어진 임계값보다 작은 한 쌍의 점에 할당된다. 할당된 인접성에 근거하여 '점 인접성 그래프'를 생성한다. 이 그래프에서 개개의 노드는 하나의 점을 포함하고, 노드와 노드를 연결하는 하나의 아크(arc)는 인접성과 그 유형을 포함한다.

(2) 종자패치의 선택: 종자패치는 점들의 집합으로 구성되며 평면패치를 성장시키기 위한 초기패치로 사용된다. 이러한 종자패치의 집합은 가능한 완전(complete)하고 균질(homogeneous)해야 한다. 여기서 완전성은 점들의 집합에 실제로 포함된 모든 평면패치가 종자패치들로부터 성장될 수 있어야 한다는 것을, 균질성은 종자패치가 주어진 표면모델에 충분히 부합되어야 한다는 것을 의미한다. 종자패치를 선택하는 과정은 먼저 모든 개개의 점들로부터 하나의 작은 패치를 생성하고, 각각의 패치에 주어진 표면모델로 근사하고, 이러한 종자패치를 힙(heap)에 저장한다. 여기서 힙은 이어지는 패치 성장 과정에서 표면모델에 가장 부합하여 최소의 근사 오차를 갖는 종자패치가 먼저 꺼내질 수 있도록 패치들을 효율적으로 저장하는 데이터 구조이다.

(3) 평면패치의 성장: 평면패치를 종자패치로부터 성장시키고 검증한다. 성장 과정은 힙으로부터 순차적으로 꺼내온 하나의 종자패치를 초기패치로 설정하는 것으로 시작된다. 이 패치에 인접한 점이 패치와 통계적으로 부합하면 부합된 점을 평면패치에 추가하는 것을 인접점이 더 이상 부합하지 않을 때까지 반복하여 수행한다. 이렇게 성장된 패치는 크기, 거칠기, 기하학적 모양에 근거하여 검증한다.

(4) 패치경계의 계산: 평면패치의 경계는 패치의 내부점들이 나타내는 일반적인 윤곽(outline)을 의미한다. 본 논문에서는 표면경계를 계산하기 위해 Edelsbrunner 등(1983)이 개발한 알파 윤곽 알고리즘(the alpha-shape algorithm)을 이용한다. 알파 윤곽은 Delaunay 삼각망(triangulation)의 부분 그래프이다. 여기서 변수 알파에 따라 생성된 윤곽의 해상도가 결정된다.

3.2.2 다면체 모델의 구성

분할된 평면패치의 집합에서 패치 사이의 인접성을 설정하고, 가장자리와 구석점을 추출하고, 이를 통해 각각의 패치의 경계를 보완한 후 가장자리, 구석점, 평면패치를 그룹핑하여 다면체 모델을 구성한다.

(1) 패치의 인접성의 설정: 추출된 평면패치의 상호적인 인접성을 패치경계사이의 거리로 결정되는 패치 사이의 간격에 의거하여 간격이 주어진 임계값보다 작은 한 쌍의 패치에 할당된다. 점의 인접성의 경우와 비슷하게 '패치 인접성 그래프'를 생성한다.

(2) 가장자리의 추출: 패치 인접성 그래프에서 명시된 인접한 모든 패치의 쌍으로부터 가장자리의 추출을 시도한다. 하나의 인접한 패치의 쌍으로부터 각각의 패치를 포함하는 두 개의 평면이 교차하는 직선 끝, 교선(intersection)을 계산한다. 이 때 인접한 두 패치의 사이각이 너무 작거나 계산된 교선이 각각의 패치경계로부터 너무 멀리 떨어져 있는 경우에는 계산된 교선의 신뢰성이 많이 떨어지므로 버린다. 나머지 경우 무한히 긴 교선의 길이를 제한하기 위해 교선의 양끝점을 패치의 공간적인 범위를 바탕으로 결정하고 이를 가장자리로 명시한다.

(3) 구석점의 추출: 패치 인접성 그래프로부터 세 개의 패치로 상호인접한 경우를 찾아낸다. 찾아낸 세 개의 패치의 집합으로부터 각각의 패치를 포함하는 세 개의 평면이 교차하는 점 끝, 교점을 계산한다. 가장자리의 경우와 비슷하게 패치의 사이각의 크기와 교점과 패치경계 사이의 거리를 고려하여 계산된 교점의 신뢰성을 평가한다. 신뢰성이 높은 교점은 구석점으로 명시한다.

(4) 패치경계의 보완: 패치를 구성하는 점의 윤곽으로부터 계산한 경계는 일반적으로 직선과 같은 매끄럽고 단순한 경계를 갖지 못하고 상당히 거칠은 선으로 구성된다. 이러한 경계를 추출한 가장자리와 구석점을 바탕으로 가능한 직선의 형태가 되도록 보완한다.

(5) 그룹핑: 가장자리, 구석점, 평면패치를 인접성 기준으로 그룹핑하여 다면체 모델을 생성한다.

4. 적용 및 결과 분석

그림 7은 각각 10개의 데이터 셋을 정합한 모습을 그림 8은 정합할 때 발생한 오차의 크기를 보여준다. 그림 9는 정합된 데이터로부터 추출한 빌딩 모델로부터 형성한 단면도를 실제 시공시의 설계 단면도와 비교하여 보여준다. 아직 정합의 결과와 모델링의 결과에 대한 정량적 분석은 수행하지 못했지만 육안 검사를 통한 정성적 평가로는 상당히 합리적인 결과를 얻었다는 것을 알 수 있다.

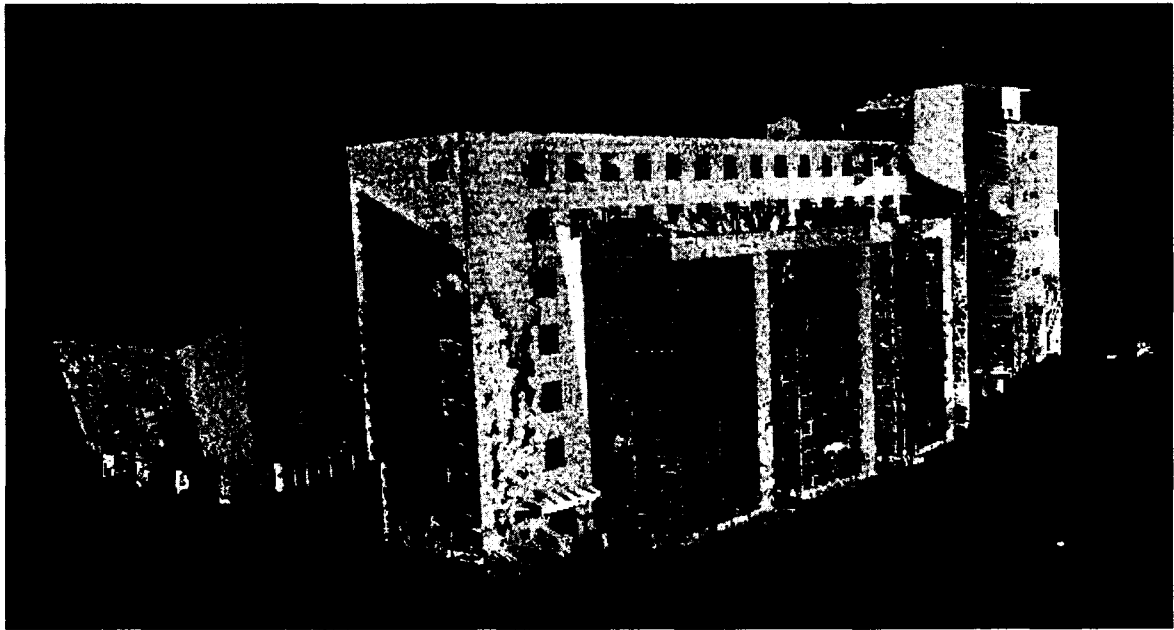
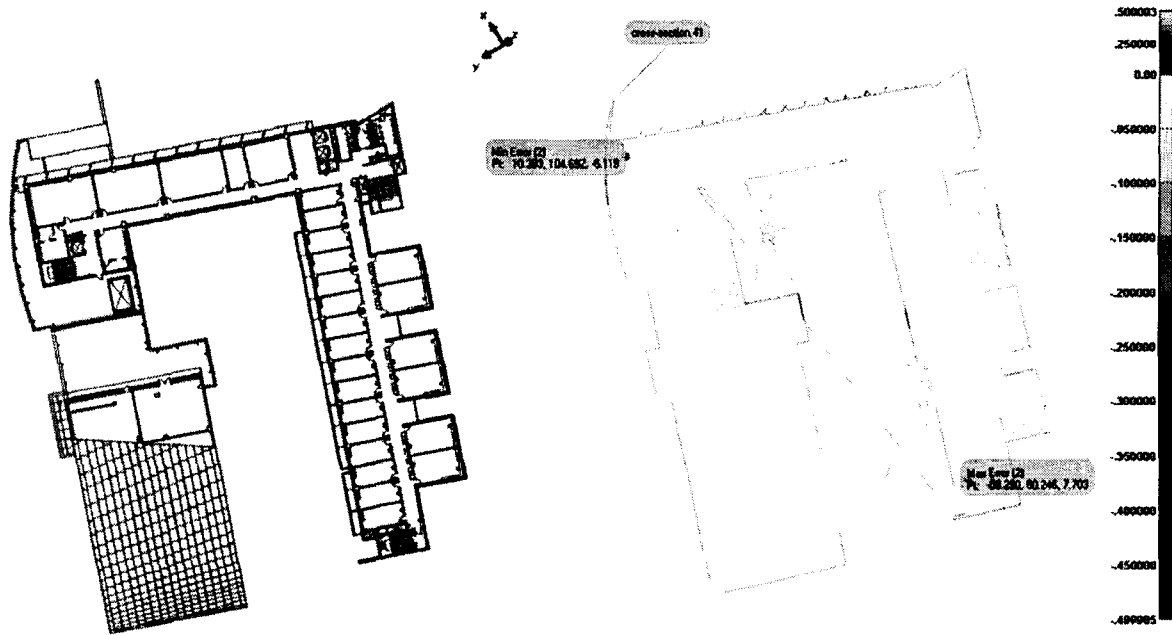


그림 7. 10개의 데이터 셋을 정합한 모습 (화면에 파란 부분은 스캔이 되지 않은 부분)



그림 8. 정합 오차의 크기(색으로 표현한 오차의 크기; 단위는 m)



(a) 설계 단면도

(b) 모델링 단면도

그림 9. 대상건물의 4층 설계 단면도와 빌딩 모델링으로부터 얻은 단면도의 비교

5. 결론

본 연구는 지상 라이다를 이용한 건물의 3차원 정밀 모델링을 수행하였다. 아직까지 연구의 초기 단계이지만 제한적인 시험을 통해 방법의 유효성은 어느 정도 확인할 수 있었다. 향후 많은 연구가 추가적으로 수행되어야 할 것이다. 특히, 모델링을 위해 데이터를 처리하는 과정의 많은 부분들이 사용자의 조정이나 작용을 요구하는데 이러한 부분들에 있어서 자동화에 대한 많은 연구가 필요하다. 또한, 제안된 방법의 검증을 위해 다양한 건물을 대상으로 시험을 수행하고 수행결과에 대한 정량적인 분석이 필요하다.

감사의글

본 연구는 서울시립대학교의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- Edelsbrunner, H., Kirkpatrick, D. G. and Seidel, R. (1983), On the shape of a set of points in the plane. *IEEE Transactions on Information Theory*, Vol. 29, No. 4, pp. 551-559.
- Halla, N. and Brenner, C. (1999), Extraction of buildings and trees in urban environments, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 54, No. 2-3, pp. 130-137.
- Jung, F. (2004), Detecting building changes from multitemporal aerial stereopairs, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 58, No. 3-4, pp. 187-201.
- Lee, I., and Schenk, T. (2001a), Autonomous extraction of planar surfaces from airborne laser scanning data, In: *ASPRS Annual Conference*, St. Louis-MO.

- Lee, I., and Schenk, T. (2001b), 3D perceptual organization of laser altimetry data, In: *Int. Arch. Photogramm. Remote Sensing*. Annapolis-MD, Vol. XXXIV, Part.3/W4, pp. 57-65.
- Lee, I., and Schenk, T. (2002), Perceptual organization of 3D surface points, In: *Int. Arch. Photogramm. Remote Sensing*. Graz-Austria. Vol. XXXIV, Part.3A, pp. 193-198.
- Lee, I. (2002), *Perceptual Organization of Surfaces*. Ph.D. Dissertation, Dept. of Civil and Environmental Engineering and Geodetic Science, The Ohio State University, Columbus, OH.
- Maas, H. -G. and Vosselman, G. (1999), Two algorithms for extracting building models from raw laser altimetry data, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 54, No. 2-3, pp. 153-163.
- Suveg, I. and Vosselman G., (2004), Reconstruction of 3D building models from aerial images and maps, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 58, No. 3-4, pp. 202-224.