

연구논문

도시지역 LiDAR DSM으로부터 DEM추출기법 연구 DEM Extraction from LiDAR DSM of Urban Area

최연웅* · 조기성**

Choi, Yun-Woong · Cho, Gi-Sung

要 旨

최근에는 LiDAR 시스템의 등장으로 기존의 항공사진측량에 비하여 효율적이고, 경제적으로 도시지역의 수치표고자료를 효과적으로 구축할 수 있게 되었으나, 도시지역에서는 다양한 형태의 객체들이 모두 포함된 DSM(Digital Surface Model) 형식의 자료를 취득하게 된다. 따라서, 홍수범람예측에 있어서의 인공지물의 영향 해석 등을 위하여 건물이 제거된 지형에 관한 상세한 정보를 제공하기 위해서는 DSM으로부터 DEM(Digital Elevation Model)을 추출하기 위한 전처리 과정이 필요하다. 본 연구는 LiDAR 시스템으로부터 취득된 도시지역에 대한 DSM으로부터 건물 등이 제거된 DEM을 추출하기 위한 연구로서 영상처리기법의 경계검출 알고리즘을 적용하여 건물 등의 지물들에 대한 경계를 추출하였으며, 선행연구에서 건물로 추출된 지역에 대하여 보간법을 적용함으로써 발생하는 원시 DSM 자료의 변형에 따른 대안으로써, 추출된 경계에 대하여 평균값 필터링, 중간값 필터링, 최소값 필터링을 각각 적용함으로써 원시 DSM 자료의 변형을 최소화하여 건물 등의 지물들을 제거하였으며, LiDAR DSM으로부터 DEM을 제작하는 과정을 간략화, 자동화하였다.

핵심용어 : LiDAR, 수치표고모형, 영상처리기법, 경계검출, 필터링

Abstract

Nowadays, it is possible to construct the DEMs of urban area effectively and economically by LiDAR system. But the data from LiDAR system has form of DSM which is included various objects as trees and buildings. So the preprocess is necessary to extract the DEMs from LiDAR DSMs for particular purpose as effects analysis of man-made objects for flood prediction. As this study is for extracting DEM from LiDAR DSM of urban area, we detected the edges of various objects using edge detecting algorithm of image process. And, we tried mean value filtering, median value filtering and minimum value filtering of detected edges instead of interpolation method which is used in the previous study and could be modified the source data. it could minimize the modification of source data, and the extracting process of DEMs from DSMs could be simplified and automated.

Keywords : LiDAR, DEM, Image Processing, Edge Detection, Filtering

1. 서 론

국가 기본지리정보에 포함되어 있는 수치표고자료(Digital Elevation Model ; DEM)는 지형복원 및 다양한 형태의 지형분석에 반드시 필요하며 국토계획 및 관리, 토목, 환경, 자원, 통신, 군사 등 다양한 분야에서 활용이 되고 있다⁽¹⁾. 특히, 도심지에서 지형(Ground)과 건물 등의 인공지물들을 분리시키므로써 지형의 표고에 관한 상세한 정보를 제공하는 것은 홍수범람예측 및 해수면 상승에 있어서의 인공지물의 영향 등을 예측하는데 사용될 수 있다^(2,3).

현재 DEM은 대부분의 사용자가 1/1,000 및 1/5,000 수치지도에서 등고선 및 표고값을 추출하여 사용목적에 맞게 제작하여 활용하고 있으나, 이는 건물 등과 같이 지형상에 존재하는 다른 인공 및 자연지물 객체들의 표고 정보를 포함하지 않게 된다⁽¹⁾.

최근에는 LiDAR 시스템의 등장으로 기존의 항공사진측량과 비교하여 효율적이고, 경제적으로 도시지역의 DEM을 효과적으로 구축할 수 있게 되었으나⁽⁴⁾, LiDAR 시스템에서도 레이저 펄스가 투과하지 못하는 건물지역 등에서는 수목과 같은 자연지물 및 건물 등의 인공지물이 모두 포함된 DSM(Digital Surface Model) 형식의 자

2005년 3월 4일 접수, 2005년 3월 17일 채택

* 주저자, 전북대학교 대학원 토목공학과 박사과정 (choiyun@chonbuk.ac.kr)

** 정회원, 전북대학교 토목공학과 교수 (gscho@chonbuk.ac.kr)

료를 취득하게 되어 LiDAR 시스템으로부터 취득한 DSM 으로부터 DEM을 추출하기 위해서는 건물 등의 지물을 제거하는 전처리 과정이 필요하다⁽⁵⁾.

최근 도시지 DEM 제작을 위한 전처리 과정에 관하여 건물 등의 지형상의 지물들은 주변 지형보다 높다는 가정에 기반을 두고 LiDAR DSM으로부터 건물 등의 지물들을 추출하고 추출되어 제거된 부분은 주변값으로 보간하는 방법 등이 제안되고 있다⁽²⁾.

특히 건물 등의 지물들을 추출하는 다양한 알고리즘이 개발되고 있으나 대부분의 경우 자료의 출처가 다른 수치지도 등의 보조자료를 활용하거나^(6,9), 건물에 관한 사전지식을 통한 건물의 기하학적 조건을 이용하고 있으며^(10,11), 완전 자동화는 어려운 실정으로 부분적인 수작업이 병행되고 있을 뿐만 아니라 제거된 부분을 보간하는 과정에서 원본 자료가 변형되는 문제가 있다⁽⁵⁾.

본 연구는 LiDAR 시스템으로부터 취득된 도시지역에 대한 DSM으로부터 건물 등이 제거된 DEM을 추출하기 위한 연구로서 영상처리기법의 경계검출 알고리즘을 적용하여 건물 등의 지물들에 대한 경계를 추출하고, 선형 연구^(2,5)에서 건물로 추출된 지역에 대하여 보간법을 적용함으로써 발생하는 원시 DSM 자료의 변형에 따른 대안으로써, 추출된 경계에 대하여 평균값 필터링, 중간값 필터링, 최소값 필터링을 각각 적용함으로써 원시 DSM 자료의 변형을 최소화하여 건물 등의 지물들을 제거한 DEM을 추출하는 기법을 제시하고자 한다.

2. 항공레이저측량

LiDAR(Light Detection and Ranging) 시스템은 주로 항공기에 장비를 탑재하여 측량을 수행하므로 ALS(Airborne Laser Scanner)라고 하며, 레이저를 사용하므로 LADAR(LAsER Detection and Ranging)라고도 한다. LiDAR 시스템은 자동처리가 가능하기 때문에 처리속도가 빠르고, 자체적으로 레이저를 발사하고 반사광을 측정하는 능동적 센서이므로 일광을 필요로 하지 않아 날씨에 구애를 받지 않고 측량이 가능하다⁽¹¹⁾.

LiDAR 시스템은 GPS(Global Positioning System), IMU(Inertial Measuring Unit) 및 레이저스캐너로 구성되어 있으며, 데이터의 처리와 장비의 운영 및 실제 관측을 위한 데이터 저장매체, 지상기준국용 GPS, 작업계획 및 데이터 처리를 위한 소프트웨어, 항법장치 및 추가적인 자료획득 보조장비로 비디오나 디지털 사진기가 사용되기도 한다⁽¹²⁾.

항공레이저측량은 그림 1에서와 같이 LiDAR 시스템을 항공기에 장착하여 레이저 펄스를 지표면에 주사하

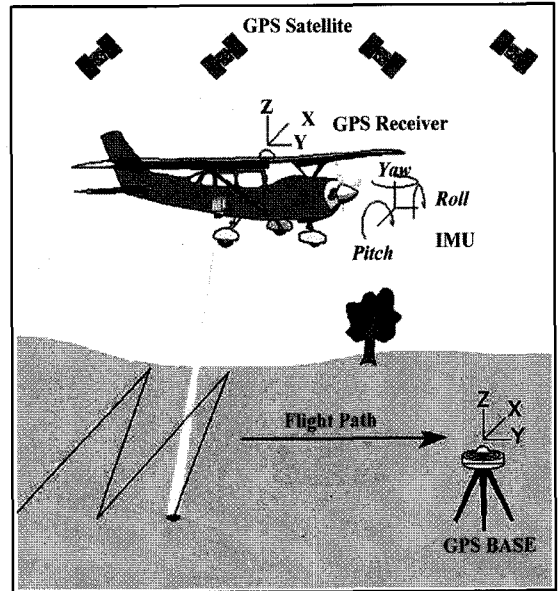


그림 1. LiDAR 시스템 개요

고, 반사된 레이저 펄스의 도달시간을 측정함으로써 반사 지점의 공간 위치 좌표를 계산하여 지표면에 대한 지형정보를 추출하는 측량기법으로 GPS가 센서의 위치를, INS가 센서의 자세를, Laser가 센서와 지표면과의 거리를 측정하여 지표면의 표고점에 대한 3차원 X, Y, Z 좌표를 결정하며, 일반적으로 수직정확도 15cm, 수평정확도 30cm의 우수한 정확도를 갖는다. 또한, 레이저센서 전면에 부착된 거울이 회전하여 지표면을 Scanning 하므로 보다 넓은 지역을 측정할 수 있으며, Scanning Angle, Scanning Rate, 비행고도, 비행속도, 초당레이저측정회수 등이 측량의 밀도와 특성을 결정하게 된다.

3. 경계검출기법

영상에서의 경계는 물체의 위치, 크기, 모양 및 텍스처에 관한 많은 정보가 포함되어 있으며, 경계에 해당하는 픽셀을 구하는 방법을 경계 검출이라고 한다. 현재까지 경계검출에 관한 여러 가지 방법이 제안되어 있으나, 오래전부터 활발히 연구된 분야임에도 불구하고 모든 종류의 영상에 대하여 완벽하게 경계를 검출하는 방법은 개발되지 않았다.

경계는 그림 2와 같이 영상의 명암이 낮은곳에서 높은 곳으로 혹은 높은곳에서 낮은곳으로 불연속적인 변화가 발생하는 지점에 존재하며, 일련의 화소들을 감산한 값에서 최대값을 결정하는 방법이 가장 단순하고 빠른 경계 검출 방법으로 유사 연산자(Homogeneity operator)

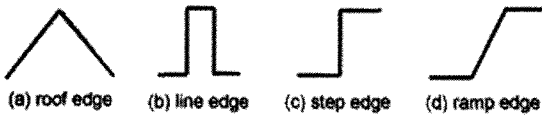


그림 2. 경계의 종류

및 차연산자를 이용한 방법이 있다. 그러나, 이러한 연산자는 빠른 속도로 경계 검출을 수행할 수는 있으나 복잡한 형태의 경계검출에는 한계가 있으며, 좀더 복잡한 경계검출 방법으로써 1차 미분연산자와 2차 미분연산자를 이용한다⁽¹⁴⁾.

3.1 1차미분법

일반적으로 1차 미분은 접선의 기울기를 나타낸다. 이 방법은 1차 미분의 성질을 이용하여 영상 값이 급격히 변하는 곳, 즉 경계를 찾고자 하는 것으로 이러한 경계 검출 연산은 모두 화소 명암의 기울기(gradient)를 기초로 한다.

경계의 크기는 다음과 같이 행검출기 H_r 과 열검출기 H_c 의 벡터 합으로 결정될 수 있으며⁽¹⁴⁾,

$$H(x, y) = \sqrt{H_r^2(x, y) + H_c^2(x, y)} \quad (1)$$

계산상의 편의를 위하여 다음과 같이 나타낼 수도 있다.

$$H(x, y) = |H_r(x, y)| + |H_c(x, y)| \quad (2)$$

또한, 경계의 방향은 다음 식에 의해 산정된다.

$$\theta = \tan^{-1} \frac{H_c(x, y)}{H_r(x, y)} \quad (3)$$

1차 미분을 이용한 경계 검출 방법에는 차분(Difference) 연산자, Sobel 연산자, Roberts 연산자, Kirsch 연산자, Robison 연산자, Prewitt 연산자 등이 있으며, 그림 3은 1차미분 연산자들에 대한 일반적인 회선 마스크(convolution mask)를 나타낸다.

3.2 2차 미분법

2차 미분은 1차 미분을 다시 한번 미분 하는 방법으로, 경계의 방향을 단일화하고 경계의 강도만을 검출하는데 사용되며, 검출된 경계의 윤곽선들이 폐곡선을 이루며, 명암이 점차적으로 변화되는 영역에 대해서는 반응을 보이지 않는다는 장점이 있다.

2차 미분을 이용한 경계 검출 방법의 대표적인 것은 라플라시안 경계 필터(Laplacian edge filter)로서, 다른

H_r			H_c		
-1	0	1	1	2	1
-2	0	2	0	0	0
-1	0	1	-1	-2	-1

(a) Sobel 마스크

1	0	1	1	1	1
-1	0	1	0	0	0
-1	0	1	-1	-1	-1

(b) Prewitt 마스크

0	0	-1	-1	0	0
0	1	0	0	1	0
0	0	0	0	0	0

(c) Roberts 마스크

그림 3. 1차 미분연산자들의 일반적인 회선 마스크

연산자들 보다 더욱 뚜렷한 경계를 검출하는 특징을 갖고 있으나, 잡음에 매우 민감하다는 단점이 있으며, 그림 4와 같은 마스크를 이용하여 회선함으로써 경계를 검출할 수 있다⁽¹⁴⁾.

잡음에 상대적으로 덜 민감한 2차 미분 경계 검출기는 라플라시안-가우시안(Laplacian of Gaussian ; LoG) 연산자이다. 이는 라플라시안을 적용하기 전에 가우시안 스무딩을 수행함으로써 잡음을 미리 제거하는 방법으로 잡음을 제거하는 효과는 있으나 경계를 무디게 하여 검출된 경계의 굵기를 넓게 만드는 단점이 있으며, 다음과 같은 형태의 마스크를 회선함으로써 수행된다⁽¹⁴⁾.

$$LoG(x, y) = \frac{1}{\pi\sigma^4} \left[1 - \frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2} \right] e^{-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}} \quad (4)$$

0	-1	0	또는	-1	-1	-1
-1	4	-1		-1	8	-1
0	-1	0		-1	-1	-1

그림 4. 라플라시안 마스크

4. 적용 및 고찰

4.1 대상지역 및 연구내용

본 연구는 2층 이하에서 10층 이상의 다양한 높이의 건물이 복합적으로 나타나는 특성을 갖는 경기도 구리시를 대상지역으로 하였으며, 그림 5와 같은 방법으로 연구를 수행하였다.

먼저 취득된 LiDAR 원시자료를 이용하여 1m 해상도의 DSM을 구축하고 우선 라플라시안 연산자를 이용하여 경계를 추출한다. 경계로 추출된 셀에 대하여 5×5 크기의 평균값 필터, 중간값 필터, 최소값 필터를 각각 적용하되, 필터링 과정에서 선택되는 24개의 셀 중 이미 또다른 경계로 추출된 셀은 연산에서 제외하였다. 또한, 연산에 사용되는 셀의 개수가 최소 9개를 넘지 않는 경우 필터의 크기를 7×7 혹은 그 이상으로 증가시키도록 구현하였으며, 라플라시안 경계 검출과정에서 필터링까지의 과정을 계속 반복함으로써 DSM상의 건물들을 모두 제거하여 대상지역에 대한 DEM을 추출하고 최종적으로 추출된 DEM과 최초의 DSM의 표고값을 비교하여 추출된 DEM의 정확도를 각 필터별로 평가하였다.

4.2 LiDAR DSM 구축

본 연구에서는 ±15cm 미만의 표고정확도를 갖는 ALTM(Airborne Laser Terrain Mapper) 2050 레이저 시스템을 이용하여 점밀도 3.0점/m²의 원시자료를 취득하였다.

또한, 취득된 원시자료는 Trimble사의 TGO와 RealM ASCII 처리모듈을 이용하여 GPS 오차보정 및 원시자료 보정을 실시하였으며, WGS84 UTM 좌표계의 원시자료를 벡셀 TM 좌표계로 변환하고, LiDAR 측량에 의한 타

원체고는 EGM96 모델을 이용하여 정표고로 변환한 후, ESRI사의 ArcGIS를 이용하여 1m 해상도의 DSM을 구축하였다.

그림 6은 LiDAR 자료로부터 구축한 연구대상지역에 대한 DSM을 나타내며, 표 1은 자료취득시의 비행설계 내역이다.

4.3 경계추출

경계 검출기법은 영상처리분야에서 많은 연구가 계속되고 있는 분야로서 본 연구에서는 현재까지 소개된 경계검출기법 중 검출된 경계의 윤곽선들이 폐곡선을 이루고, 명암이 점차적으로 변화되는 영역에 대해서는 반응을 보이지 않으며, 다른 연산자들 보다 더욱 뚜렷한 경계를 검출하는 특징을 갖는 라플라시안 연산자를 사용하였다.

그림 7은 라플라시안 연산자를 이용한 대상지역 DSM에 대한 최초 경계검출 결과로써, 잡음에 민감한 라플라시안 연산자의 특성상 다소 많은 경계가 검출되었으나, 잡음을 제거하기 위하여 가우시안 스무딩 등의 작업을 선행하는 경우 최초 DSM을 변형시킬 수 있으며, 검출된 셀이 잡음에 의하여 잘못 검출되었다 해도 결과적으로는 검출된 경계셀이 모두 주변셀에 의하여 제거되기 때문에 본 연구에서는 잡음 제거를 위한 작업은 수행하지 않았다.

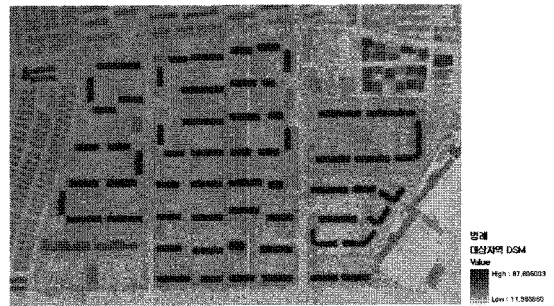


그림 6. 대상지역 LiDAR DSM

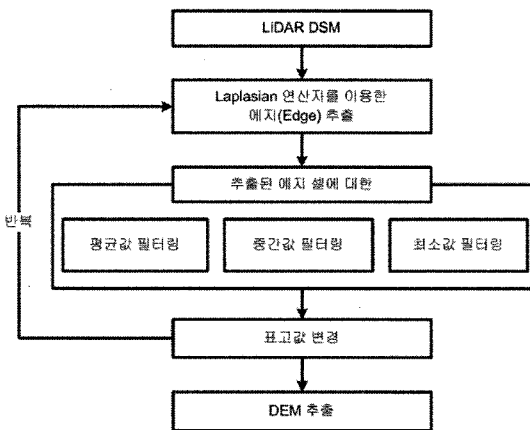


그림 5. 연구 흐름도

표 1. 비행설계내역

설 계	내 용
점밀도	3.0점/m ²
펄스 주파수	41~47kHz
비행고도	1,000~1,200m
주사각	±15°
중중복도	50% 이상

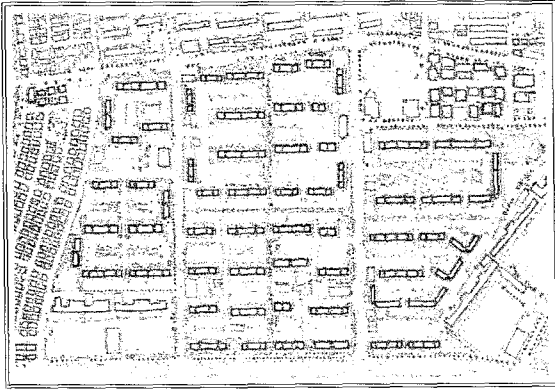


그림 7. 대상지역 DSM으로부터 라플라시안 연산자를 이용한 경계검출결과

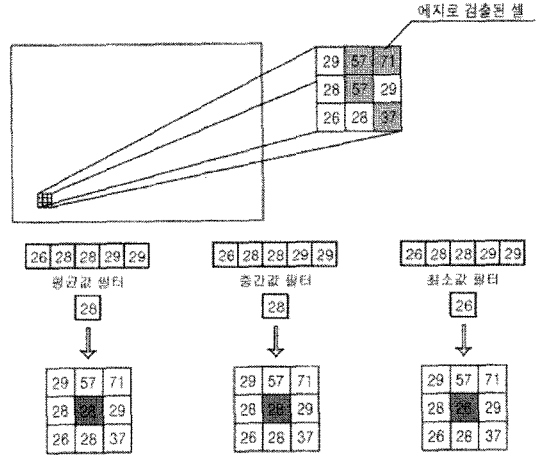


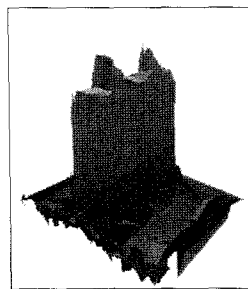
그림 8. 추출된 경계에 대한 필터링 개요

4.4 추출된 경계에 대한 필터링을 통한 DEM 구축

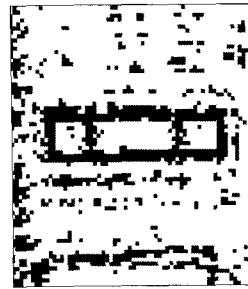
일반적으로 선행연구⁽¹⁵⁾에서는 경계추출 알고리즘을 사용하여 경계를 추출하고 추출된 경계를 이용하여 건물 등의 지물을 추출한다. 그러나, 일반적으로 추출된 경계는 지그재그 형식을 띄고 있어 직접 건물의 경계로 사용하기는 어려움이 있으며 따라서 이를 개선하기 위한 별도의 알고리즘이 필요하게 된다.

본 연구에서는 라플라시안 연산자를 통하여 경계로 추

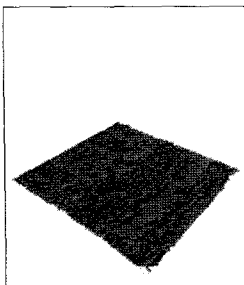
출된 셀에 대하여 3×3 크기의 평균값 필터, 중간값 필터, 최소값 필터를 각각 적용하되, 필터링 과정에서 선택되는 8개의 셀 중 이미 다른 경계로 추출된 셀은 연산에서 제외하였으며, 경계로 추출되지 않은 셀이라 해도 그 표고값이 필터의 중심값과 유사한 경우(1m 이상 차이가 나지 않는 경우)에도 연산에서 제외하였다. 또한, 연산에



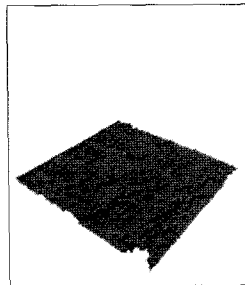
(a) 원본 DSM



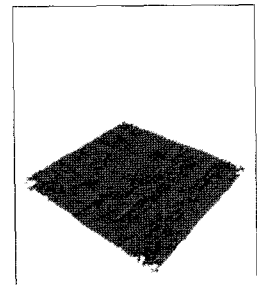
(b) 최초 경계추출결과



(c) 평균값 필터링 결과



(d) 중간값 필터링 결과



(e) 최소값 필터링 결과

그림 9. 대상지역내 고층건물지역에 대한 DEM 추출결과

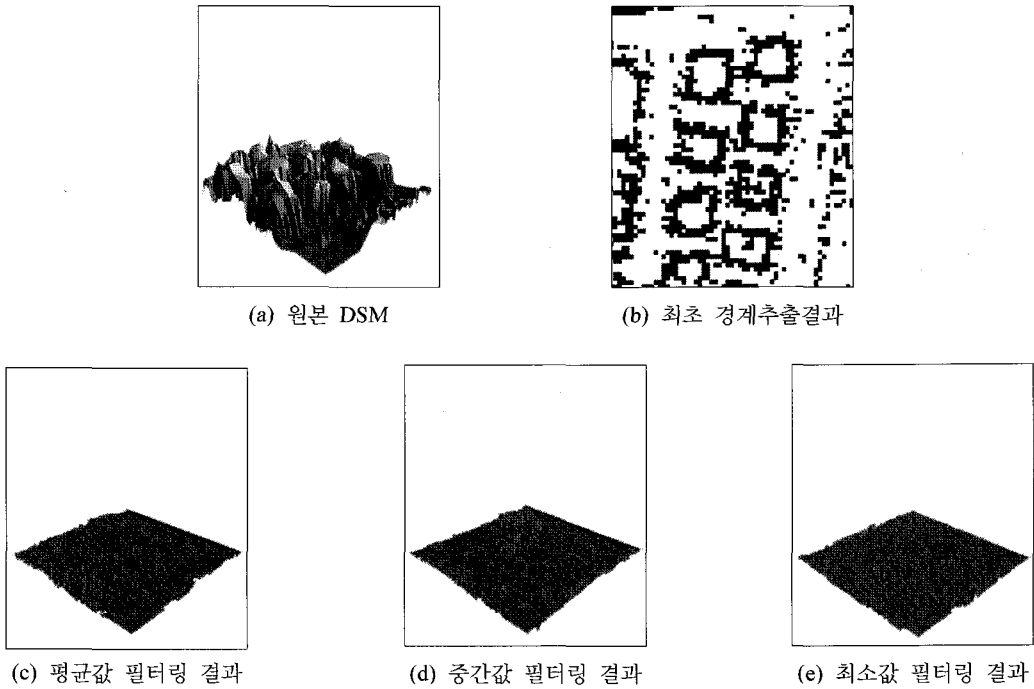


그림 10. 대상지역내 낮은건물지역에 대한 DEM 추출결과

사용되는 셀의 개수가 너무 적어지는 것을 방지하기 위하여 연산에 사용되는 셀의 개수가 최소 8개를 넘지 않는 경우 필터의 크기를 5×5 혹은 그 이상으로 증가시키도록 구현하였다. 그림 8은 본 연구에서 적용된 경계로 추출된 셀에 대한 필터링 방법에 관하여 나타낸 것이다.

그림 9 및 그림 10은 본 연구에서 제시하고 있는 방법으로 추출된 대상지역내 DEM 추출 결과 중 건물주변의 표고가 20~21m, 건물표고가 66m인 고층건물 및 건물 주변표고 20~22m, 건물표고 31~32m의 낮은 건물 지역에 대한 결과를 적용된 필터별로 확대하여 나타낸 것이다.

고층건물에서 평균값 필터를 사용한 경우 그림 9(c)에서 건물이 있던 부분의 표고는 약 23m로서 건물 주변의 표고 20m와는 차이를 보이고 있어 건물들이 완전히 제거되지 않음을 볼 수 있다. 이는 경계로 검출된 셀의 표고값이 주변 표고값들의 평균값으로 치환되면서 주변과의 표고차가 적어지나 그 기울기 또한 작아지면서 더 이상 경계가 검출되지 않기 때문에 나타난 현상이라 판단되며, 그림 10(c)의 낮은 건물지역에서도 상당부분 같은 현상이 나타남을 알 수 있다.

그림 9(d) 및 그림 10(d)는 중간값 필터에 의한 결과를 나타낸다. 고층건물 및 낮은 건물지역에서 건물이 제거된 후의 표고가 각각 21m 및 20~21m로서 각 필터들

중 가장 좋은 결과를 보여주고 있으며, 특히 그림 10(d)의 낮은 건물들이 밀집되어 있는 경우에도 건물들 사이의 표고값을 그대로 반영하고 있다.

그림 9(e) 및 그림 10(e)는 최소값 필터를 사용한 결과이다. 건물이 모두 제거되었다는 관점에서는 중간값 필터를 사용했을 때와 같이 비교적 좋은 결과를 보여주고 있으나, 고층건물 및 낮은 건물 지역에서 모두 중간 값 필터를 사용했을 때보다 약 1~2m 가량 낮은 결과를 나타내었다. 특히, 그림 10의 경우 그림 10(e)에서 낮은 표고값이 확장되어 나타나있는 것을 알 수 있다. 이것은 최소값 필터링 과정에서 연산에 사용된 주변 셀 값들 중 가장 작은 값으로 치환하게 되므로 자료상의 오류 등으로 인하여 과도하게 낮은 표고 값이 존재하거나 지형상에 급격하게 낮아지는 지역이 있어 이 부분에 경계가 추출되는 경우 경계로 추출된 셀의 표고를 부근의 가장 낮은 표고로 치환하면서 계속 확장시키기 때문이다.

따라서, 평균값 필터 및 최소값 필터를 사용하는 것보다는 중간값 필터를 사용하는 것이 보다 현실에 가까운 표고값을 얻을 수 있다고 판단된다.

5. 결 론

본 연구는 LiDAR 시스템으로부터 취득된 도시지역에 대한 DSM으로부터 건물 등이 제거된 DEM을 추출하기 위한 연구로서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 라플라스 연산자를 이용한 영상처리기법의 경계 검출 알고리즘과 추출된 경계 셀에 대한 필터링 기법을 이용하여 LiDAR DSM으로부터 건물 등을 제거할 수 있었다.

둘째, 추출된 경계에 대한 필터링 기법을 적용함에 있어 평균값 필터 및 최소값 필터보다는 중간값 필터를 사용함으로써 보다 현실에 가까운 표고값을 얻을 수 있었다.

셋째, 추출된 경계에 대한 필터링을 통하여 경계로 추출된 셀 주변 표고값들을 자료의 변형없이 활용하여 건물지역을 제거함으로써 건물로 추출된 지역에 대하여 보 간법을 적용하여 발생하는 원시 DSM 자료의 변형의 문제점을 최소화 할 수 있는 방법을 제시하였다.

감사의 글

LiDAR 자료를 제공해주신 한국수자원공사에 감사드립니다.

참고문헌

1. 최윤수, 한상득, 위광재. 2002. 도화원도를 이용한 LiDAR DEM의 정확도 평가. 한국측량학회지 20(2) : 23-32.
2. Priestnall G., Jaafar J. and Duncan A. 2000. Extraction urban features from LiDAR digital surface models. Computers, Environment and Urban Systems 24 : 65-78.
3. Marks, K., and Bates, P. 2000. Integration of high resolution topographic data with floodplain flow medels. Hydrological Processes.
4. Baltsavias, E. P.(1999-A). "Airborne laser scanning:existing systems and firms and other resources," ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, Vol. 54, pp. 164-198
5. 이근상, 고덕구, 김우구. 2004. 수치지형도를 활용한 홍수지도 제작용 지형자료의 효과적인 구축방법 연구. 한국지리정보학회지 7(1). 52-61.
6. Lemmens, M., Deijers, H., Looman, P., 1997. Building detection by fusing airborne laser-altimeter DEMs and 2D digital maps. IAPRS 32, 29-42 Part 3-4W2
7. Haala, N., Brenner, C. and Anders, K. 1998. "3D Urban GIS from Laser Altimeter and 2D Map Data," in ISPRS Proceedings of Commission III Symposium on Object Recognition and Scene Classification from Multispectral and Multisensor Pixel, Columbus, Ohio, USA, Vol. 32 Part 3/1 pp. 339-346
8. Githuku, A. 1998. "A Conceptual Framework for Object Recognition and Surface Reconstruction from High Resolution Multispectral and Hyperspectral Imagery." in ISPRS Proceedings if Commission III Symposium in Object Recognition and Scene Classification from Multispectral and Multi-sensor Pixels, Columbus, Ohio, USA, Vol. 32 Part 3/1, pp. 452-463
9. 이원희, 유기윤. 2003. "수치지도와 LiDAR 자료를 이용한 도시 지역 건물 3차원 모델링," 2003 공동 춘계학술대회 논문집, pp. 394-399.
10. Lin, C., huertas, A. and Nevatia, R.(1995). "Detection of Buildings from Monocular Images," Automic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Spce Images. Birkhauser-Verlag, Basel, pp. 125-134
11. McKeown, D.(1996). "Top Ten Lessons Learned In Automated Cartography," Proceedings of the 1996 DARPA Image Understanding Workshop, Palm Springs, CA.
12. 이근상, 고덕구, 채효석, 신영호. 2003. 항공레이저측량 자료의 해상도에 따른 DEM 오차 비교평가 연구. 한국지리정보학회지 6(3), pp. 33-42.
13. 한수희. 2002. LiDAR 반사강도와 고도자료를 이용한 토지피복분류에 관한 연구. 서울대학교 도시공학과 석사학위논문.
14. 최형일, 이근수, 이양원. 1997. "영상처리 이론과 실제." 홍릉과학출판사. 서울. pp. 100-117.
15. Timothy L. halthcoat, Wenbo Song and James D. Hipple. (2001). "Building Footprint Extraction and 3-D Reconstruction from LIDAR Data," IEEE/ISPRS Joint Workshop in Remote Sensing and Data Fusion over Urban Areas. pp. 74-78.