

평균필터기반 항공레이저측량 자료의 지면정보 추출기법

최연웅^{1*} · 이근상² · 채효석² · 조기성¹

Extracting Ground Information from Airborne Laser Scanning Data based on Mean Filtering Method

Yun-Woong CHOI^{1*} · Geun-Sang LEE² · Hyo-Sok CHAE²
Gi-Sung CHO¹

요 약

항공레이저측량시스템은 레이저펄스가 투과하지 못하는 건물지역에서는 DEM을 구축하기 위해 원시 DSM 자료로부터 건물 등의 지물을 제거하는 전처리 과정이 필요하다. 본 연구에서는 항공레이저측량을 이용하여 구축한 DSM 자료로부터 다양한 크기의 평균필터를 적용하였으며, 표준편차 변화율을 분석하여 39×39를 최적의 필터크기로 결정하였다. 또한 최적필터를 적용하여 분석한 DEM과 항공레이저측량 원시 DSM 자료를 상호 비교함으로써 표준오차 ±0.065m를 확보할 수 있었다. 따라서, 본 연구에서 제시한 평균필터기법이 경사가 완만한 도시지역내 DEM을 추출하는데 매우 효과적임을 알 수 있었다.

주요어 : 항공레이저측량, 지면정보, 평균필터링, 필터크기, DSM, DEM

ABSTRACT

Airborne laser scanning system needs preprocessing which removes some objects such as buildings from the raw DSM data to construct DEM in building area because the laser pulse can't penetrate into the buildings. This study applied the mean filtering method which has various size filter to the DSM data constructed by airborne laser scanning system and decided the optimal filter size as 39×39 by analyzing the standard deviation change ratio. Also, this study could get the ±0.065m standard error by comparing the optimal filtering DEM and DSM raw data of airborne laser scanning. Therefore, it could know that the mean filtering method, which is presented in this study, is very effective to extract DEM in the urban area which has a low relief.

*KEYWORDS : Airborne Laser Scanning, Ground Information, Mean Filtering
Filter Size, DSM, DEM*

2005년 9월 15일 접수 Recieved on September 15, 2005 / 2005년 11월 22일 심사완료 Accepted on November 22, 2005

¹ 전북대학교 토목공학과 Department of Civil Engineering, Chonbuk National University

² 한국수자원공사 수자원연구원 Korea Water Resources Corporation, Korea Institute of Water and Environment

* 연락처 E-mail : choiyun@chonbuk.ac.kr

서 론

수치표고모형(DEM; digital elevation model)은 수문모델링, 홍수예측 및 적지분석 등 다양한 분야에서 활용되고 있다. 최근 항공레이저측량의 도입으로 기존의 항공사진측량과 비교하여 DEM을 구축하는데 소요되는 비용 및 시간을 상당 부분 절감할 수 있게 되었다. 그러나, 건물이 밀집되어 있는 도시지역에서는 레이저 펄스가 투과하지 못하기 때문에 먼저, 인공지물이 모두 포함된 DSM 형식의 자료를 취득하고 이로부터 DEM을 추출하기 위해 건물 등의 지물과 지표면을 분리하는 전처리 과정이 필요하다(이근상 등, 2003).

일반적으로 항공레이저측량 자료에서 지표면과 건물 등의 지물을 분리하는 방법을 보면, 건물 등의 지물들은 주변 지형보다 높은 표고를 갖는다는 단순한 가정에 기반을 두고 있으며 대부분의 연구에서 자료의 출처가 다른 수치지도 등의 보조자료를 활용하고 있다. 또한 포인트 형태인 벡터구조의 원시 자료를 DSM과 같은 래스터 형식의 자료로 변형하여 사용하는 방식과 벡터구조의 원시자료를 그대로 사용하는 방식으로 크게 구분할 수 있다. 대부분의 연구에서 처리속도 및 수치해석상의 이점에 의하여 래스터방식을 채택하고 있으며, 이를 이용한 다양한 기법이 제시되어 왔다. Zheng Wang(1998)은 대상지역내 DSM의 표고값을 0~255의 값으로 정규화 하여 흑백영상(gray scale image)형식으로 변환함으로써 DSM을 표고값에 따라 명암을 달리하는 영상처리 기법을 적용하여 경계선을 검출한 후 모멘트 계산, 경계선 분류 등의 단계를 거쳐 항공레이저측량 자료로부터 건물을 추출하는 기법을 제시하였으며, Haithcoat 등(2001)은 표고값의 정규화 과정을 거치지 않고 DSM의 각 인접 셀간의 기울기를 계산하여 기울기가 크게 나타나는 셀을 경계로 검출하는 방법을 제시하였다.

국내 연구로는 최연웅과 조기성(2005)은

DSM으로부터 영상처리 기법의 경계검출 알고리즘을 이용하여 건물 경계를 추출하고 추출된 건물 경계에 대한 필터링을 실시하여 건물을 제거하는 기법을 제시한 후 평균필터, 최소값필터, 최대값필터를 각각 적용한 결과를 비교하였으며, 유환희 등(2005)은 필터링 기법을 통하여 지면 및 비지면 정보를 추출하고 건물 복원 정확도를 향상시키는 기법을 제시하였다. 또한, 좌윤석(2003)은 방대한 항공레이저 측량 자료의 처리속도 향상을 위하여 가상격자를 구성하고 벡터형식의 포인트 자료를 격자기반으로 직접 처리하는 기법을 제시하였으며, 김형태(2000)는 항공레이저 측량 자료와 항공사진을 융합하여 건물 외곽선을 추출하는 연구를 수행하였다. 또한, 래스터 방식을 이용한 방법에서는 영상처리 등에 활용되는 필터링기법, 혹은 경계검출기법을 활용하고 있다. 그러나, 경계검출기법을 활용하는 경우 검출된 경계선의 품질이 직접적으로 최종결과에 영향을 미치게 됨에도 불구하고 다양한 형태의 경계선을 검출하기 위한 일반적인 경계검출기법은 소개되지 않고 있다. 그리고, 필터링기법을 적용함에 있어 필터의 크기에 따라 처리속도가 많이 좌우되는 특성을 갖게 되는데, 이러한 필터의 크기가 최종결과물에 미치는 영향을 평가하고 적정 필터크기를 결정하는 연구는 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 항공레이저측량 자료를 이용하여 DEM을 효과적으로 추출하기 위해, 적정 필터크기를 결정하는 기법을 제시하였으며 생성한 DEM을 항공레이저측량 원시자료와 비교함으로써 그 적정성을 확보하고자 하였다. 이를 위해 항공레이저측량 자료로부터 DSM을 생성하고 생성된 DSM으로부터 지면정보를 추출함에 있어 평균필터기법을 적용하였다. 특히, 다양한 크기의 평균필터를 적용하여 표준편차 변화율을 분석함으로써 적정 필터크기를 결정하는 과정을 객관화하였다. 그림 1은 본 연구를 수행하는 과정을 나타낸 것이다.



FIGURE 1. 연구흐름도

필터링 기법

필터링 기법은 영상처리 분야에서 히스토그램 균등화 기법과 함께 영상을 복원하거나 개선하기 위한 영역처리기법 중의 하나로서 다양한 방법으로 연구되고 있다. 본 연구에서와 같이 DSM에 적용하는 경우에는 명암도 값(gray level value)을 이용하는 영상처리분야에서와는 달리 3차원 좌표를 갖는 자료의 특성에 의하여 높이값, 경사도, 형태학적 특성 등을 기본적으로 활용하게 되며, 회선기법을 이용하여 연산을 수행하게 된다(최형일, 1997).

1. 회선기법(convolution)

회선은 영상 평활화(smoothing), 영상강화(crispening, sharpening) 그리고 에지검출 등의 효과를 위하여 주로 사용되는 영상처리기법이다. 회선기법은 원시화소에 이웃한 화소들 각각에 가중치를 곱한 합이라고 할 수 있다. 가중치는 회선 마스크(mask) 혹은 회선 커널(kernel) 이라고 하는 작은 행렬에 의하여 결정되게 되며, 행렬의 차원은 일반적으로 원시화소가 중앙에 위치하도록 3×3 혹은 5×5와 같

은 홀수의 차원을 사용한다. 회선기법은 그림 2에서와 같이 회선창이라고 하는 이동창이 각 화소에 대하여 중앙에 위치하여 회선마스크와의 연산을 통하여 새로운 출력화소를 생성하게 된다.

2. 중간값 필터링(median filtering)

중간값 필터링은 광범위하게 연구되어온 비선형 영역처리 기법중의 하나로써 영상처리에 있어 명백하게 나타나는 경계들을 보존하고 기존의 경계들을 좀더 상세하게 보존할 수 있는 특징이 있다. 중간값 필터링은 그림 3에서와 같이 한 영상의 화소들에 대하여 임의 크기의 창을 움직이면서 창 내부 화소값들을 오름차순으로 정렬한 후, 중간에 해당하는 화소값을 창의 중심에 대응하는 출력영상의 위치에 할당한다. 중심값이 선택되기 때문에 중간값 필터창이 갖는 화소의 수는 홀수개가 되게 설정해야 하며 중간값 필터의 기본함수는 매우 뚜렷한 밝기를 갖는 화소들이 그들의 이웃한 화소들과 유사한 값을 갖도록 함으로써 돌출되는 화소값, 즉 잡음(noise)을 제거하는 것이다.

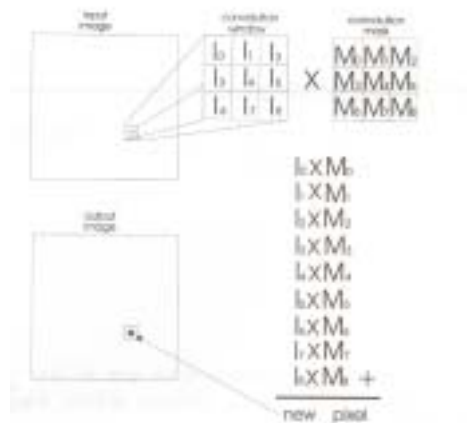


FIGURE 2. 회선기법의 개념

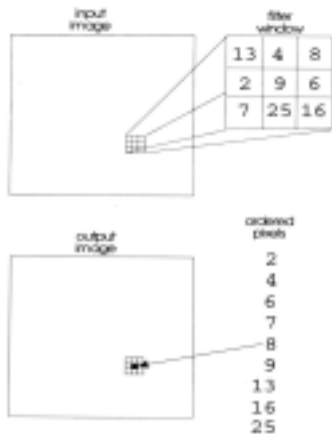


FIGURE 3. 중간값 필터링 기법 개념

3. 최대값/최소값 필터링

(maximum/minimum filtering)

최대값 필터링과 최소값 필터링은 중간값 필터링과 매우 유사한 방법으로 마스크의 중심 화소를 중간값으로 치환하는 대신 최대값이나 최소값으로 치환한다. 최대값/최소값 필터링은 각각 필터내의 최대 최소값을 중심화소에 할당함으로써 출력영상은 전체적으로 밝아지거나 어두어지게 되는 효과를 나타내게 되어 높은 대조를 갖는 영상에서 특징들을 강조하기 위하여 사용하게 된다. 최대값/최소값 필터링 기법은 주로 연속하여 사용하며 최소값 필터에 이어지는 최대값 필터를 폐쇄형 필터라고 하고 최대값 필터에 이어지는 최소값 필터를 개방형 필터라고 한다.

4. 평균값 필터링(mean filtering)

평균값 필터는 가장 간단한 선형 필터로서 중간값 필터링, 최대값 필터링, 최소값 필터링 기법과 같은 방법으로 수행되며, 각 화소들의 산술평균값을 계산하여 중심화소에 할당하는 방법으로 일반적으로 잡음을 제거하기 위한 평활화 기법으로 사용된다. 본 연구에서는 추세표면을 생성하기 위한 방법으로써 대상지역 DSM에

대하여 평균값 필터링을 수행하였으며, 필터의 크기에 따라 필터내의 각 표고값들을 산술평균함으로써 건물과 같이 높은 값들보다는 낮고, 지표면과 같이 낮은 값들보다는 높은 값으로 원시 DSM을 변형시킨 새로운 표면을 생성하여 원시 DSM으로부터 건물 등이 제거된 DEM을 생성하였다.

항공레이저측량을 이용한 DSM 구축

항공레이저측량의 기본원리는 위치를 알고 있는 공간상의 한 점으로부터 레이저를 주사하고 지상으로부터 반사된 시간을 측정하여 공간상의 한 점으로부터 지상까지의 거리를 관측함으로써 지표면의 표고를 결정하는 것으로, 레이저 주사기, GPS, INS로 구성되어 있으며, GPS가 센서의 위치를, INS가 센서의 자세를, 레이저 주사기가 센서와 지표면과의 거리를 측정하여 지표면 상의 표고점에 대한 3차원 X, Y, Z 좌표를 결정하는 것이 항공레이저측량의 위치결정 기본원리이다(최연웅, 2005). 주사방식은 한 방향 혹은 양방향으로 이루어지며, 일반적으로 진동거울(oscillating mirror), 회전주사(palmer scan), 회전다각형(rotating polygon) 및 광섬유(fiber) 주사기 등의 방식으로 지표면을 주사하여 보다 넓은 지역을 측정할 수 있다. 진동거울은 항상 지그재그 형태의 선(양방향)이나 2축 검류계(galvanometer)를 갖는 평행선 혹은 호의 양방향 만자(卍) 형태의 주사패턴(pattern)을 갖는다. 또한, 회전주사방식은 타원형의 패턴으로 주사를 수행하며, 회전다각형이나 다중면의 거울을 가진 주사기 및 광섬유 주사기는 한 방향의 평행선을 생성한다.(김형태, 2000)

본 연구에서는 2층 이하의 단독주택, 5층 이하의 연립주택 그리고 10층 이상의 아파트 등 표고가 다른 지물이 복합적으로 포함되어있는 특성을 갖는 경기도 구리시 일원을 연구대상지역으로 하였으며, 그림 4와 같은 방법으로 대상지역에 대한 격자간격 1m인 DSM을 구축하였다. 표 1과 표 2는 각각 본 연구에서 사용된 장

TABLE 1. 사용된 장비 및 소프트웨어

분류	세분류	모델 또는 목적
항공레이저스캐닝 시스템	항공레이저측량시스템	ALTM 2050
	항공기	Cessna 208
	GPS 수신기	Novatel Millenium
소프트웨어	Arc/Info	GIS 자료처리
	Imagine	영상처리
	Civil Pro	토탈스테이션 자료처리
	TGO	GPS 자료처리
	REALM	항공레이저측량 자료처리

비 및 소프트웨어와 자료취득을 위한 비행설계 내역을 나타내며, 그림 5는 취득된 항공레이저측량 자료를 이용하여 제작된 DSM을 3차원으로 표현한 것으로서 대상지역의 경우 18.01m~85.55m의 표고분포를 갖는다.



FIGURE 4. DSM 제작과정

TABLE 2. 비행설계 내역

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

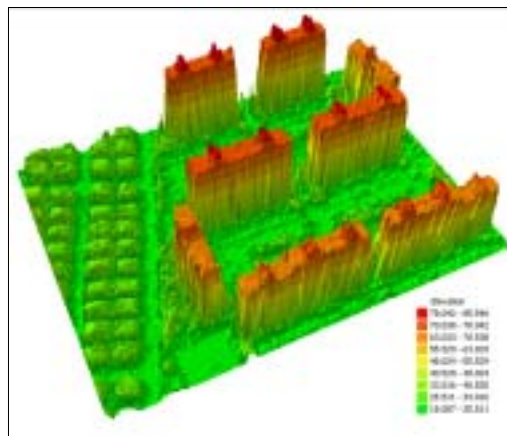


FIGURE 5. 대상지역 DSM

결과 및 고찰

1. 평균필터링을 위한 필터크기 결정 및 추세면 생성

본 연구에서는 항공레이저측량으로 취득된 자료를 이용하여 제작된 DSM으로부터 건물 등의

지형지물을 제거하기 위한 방법으로 평균필터링을 통하여 대상지역 DSM에 대한 추세면(reference surface)을 생성하고 이를 이용하는 방법을 제시하였다. 평균필터는 필터내 각 화소값들에 대한 산술 평균을 산정하고 이를 필터의 중심화소의 화소값으로 할당하는 방법으로서 필터의 크기에 따라 필터링 결과에 의하여 새롭게 할당되는 화소값들의 평균값 및 평균에 대한 표준편차 또한 달라지게 된다. 특히, 건물과 같이 주변보다 높은 값을 갖는 객체들은 필터의 크기가 증가함에 따라 주변의 낮은 값들의 영향에 의하여 상대적으로 낮은 값이 할당되며, 낮은 표고값을 갖는 지표면의 경우 주변의 높은 표고값을 갖는 건물들의 영향으로 높은 값이 할당되게 된다. 따라서, 필터의 크기에 따라 필터링 결과에 대한 화소값들의 표준편차가 작아지게 된다. 본 연구에서는 이러한 필터크기의 변화에 따른 필터링 결과에 대한 표준편차의 변화를 분석하여 최적의 필터크기를 결정하였다. 일반적으로 필터는 원시화소가 필터의 중심에 위치하도록 홀수차원의 필터를 사용하게 되며, 따라서 본 연구에서는 필터의 크기를 3×3, 5×5, 7×7과 같이 홀수차원을 갖도록 증가시켰다. 그림 6와 그림 7은 각각 9×9 및 15×15 크기의 필터를 적용하여 평균필터링을 수행한 결과를 3차원으로 표현한 것으로서 필터의 크기가 증가함에 따라 건물지역의 화소값들이 낮아지고 있음을 확인할 수 있다.

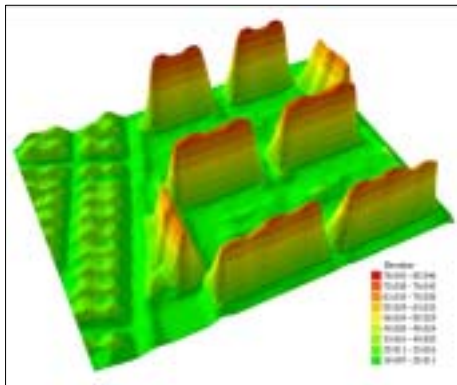


FIGURE 6. 9×9 필터적용 평균필터링 결과

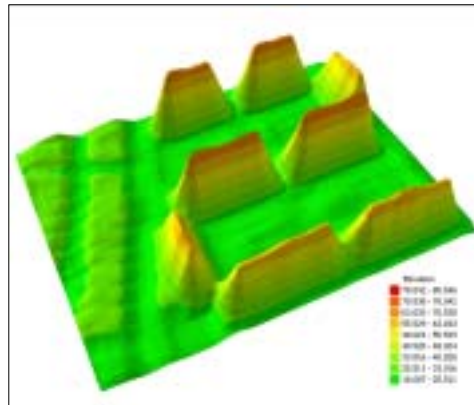


FIGURE 7. 15×15 필터적용 평균필터링 결과

또한, 그림 8은 대상지역 DSM에 대하여 3×3으로부터 41×41까지의 다양한 크기의 필터를 적용하여 평균필터링을 수행한 결과에 대한 표준편차 변화율을 나타낸 그래프로써, 필터크기가 커짐에 따라 표준편차 변화율이 증가하다가 필터크기 15×15를 기준으로 감소하는 경향을 보였으며, 특히 필터크기 39×39에서 표준편차 변화율이 일정해지는 특징을 보였다. 이는 평균필터링에 의하여 전체 자료 중 평균값에 비하여 과도하게 높거나 낮은 값이 제거되어 발생하는 결과로써 표준편차의 감소량이 일정해지는 크기의 필터를 사용하여 높은 표고값을 갖는 건물을 제거하기 위한 추세표면의 생성이 가능하다(Jaafar 등, 1999; Priestnall 등, 2000).

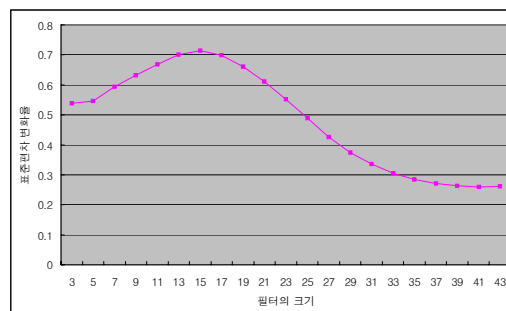


FIGURE 8. 필터크기에 따른 표준편차의 변화율

따라서 본 연구에서는 표준편차 변화율의 경계값을 나타낸 필터크기 39×39를 최적필터로 결정하여 평균필터링을 수행하였다. 필터의 크기가 다소 큰 것으로 보이나 이는 대상지역에는 지표면의 표고값과의 차이가 50m 이상이면 폭이 60m 이상인 높고 큰 건물이 다수 존재하기 때문으로 판단된다.

2. 추세면을 이용한 지면정보 추출

39×39 필터를 연구대상지에 적용하여 평균 필터링에 의하여 추세면을 생성하였으며, 그림 9는 추세면에 의하여 DSM으로부터 지형지물을 제거하는 방법을 보여준다.

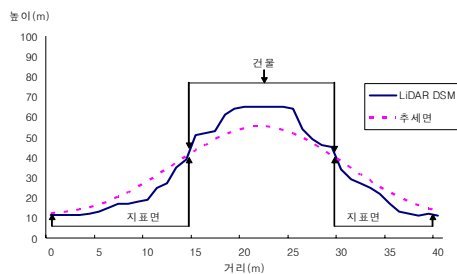


FIGURE 9. 추세면에 의한 지형지물 제거 기법

그림 9에서와 같이 평균 필터링에 의하여 생성된 추세면은 건물과 같이 높은 지역보다는 낮은쪽에, 지표면과 같이 낮은 지역보다는 높은쪽에 위치하게 된다. 따라서 생성된 추세면과 원시 DSM과의 차연산을 이용하면 추세면보다 높은 건물지역은 음수로 추세면보다 낮은 지표 지역은 양수로 나타나게 된다. 따라서, 음수로 나타난 지역을 모두 “No data” 처리함으로써 원시 DSM으로부터 건물지역을 제거할 수 있다(Jaafar와 Priestnall, 1999). 그림 10은 39×39 필터를 이용하여 생성된 추세면과 원시 DSM과의 차연산을 통하여 건물지역을 제거한 결과로서 흰색으로 표시되어있는 부분은 기존에 건물지역이 위치했던 부분으로서 “No data”에 해당되는 곳이다. 또한, 그림 11은 기준필터인

39×39보다 한단계 작은 37×37 필터를 적용한 결과로서 고층건물의 일부가 제거되지 않은 것으로 확인되었으며, 이는 본 연구에서 제시한 기준필터 39×39가 적정함을 보여주는 결과라고 할 수 있다.



FIGURE 10. 39×39 필터에 의한 건물지역 제거

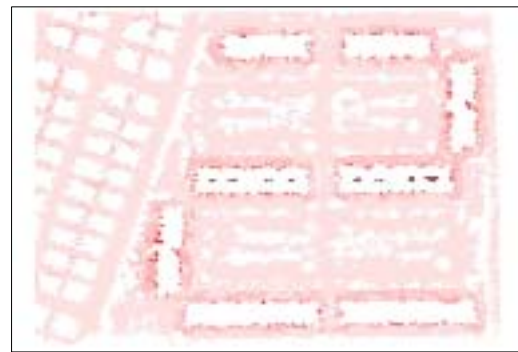


FIGURE 11. 37×37 필터에 의한 건물지역 제거

그러나, 그림 10에서도 건물경계 주변에 Noise가 일부 분포하는 것으로 확인되었으며, 이는 항공레이저측량 자료의 불규칙적인 표고점 분포와 점밀도 그리고 초기 DSM 제작에서 보 간과정 중 발생한 것으로 해석된다. 따라서 본 연구에서는 이러한 문제들을 개선하고자 추출된 건물지역 주변으로 2m의 버퍼지역을 형성하여 건물지역과 함께 제거하는 방법을 이용하였다(그림 12).



FIGURE 12. 버퍼링에 의한 건물지역 제거결과

3. 대상지역 DEM 생성

그림 13은 추세면 생성 및 원시 DSM과의 차연산을 통하여 건물지역을 제거하고 건물이 제거된 지역에 대해 주변값을 이용하여 보간한 최종 DEM 결과를 나타낸 것이다. 최초 DSM에서 18.01m~85.55m의 분포를 보였던 대상지역의 표고값이 18.08m~22.94m로 최고 85.55m의 표고값을 갖는 건물들이 모두 제거되었다. 그러나, 최종 생성된 DEM의 최소값이 최초 DSM에 비하여 0.07m 높게 나타났으며, 이는 제거된 건물지역의 보간과정에서 발생한 것으로 판단된다. 건물지역을 제거한 최종 DEM의 표고정확도를 평가하기

위해서는 건물을 포함한 검사점에 대한 표고오차 분석이 필요하다. 하지만, 건물을 제거할 수 없는 현실적인 여건상 건물 인근의 항공레이저측량 원시자료와 최종 DEM의 표고오차를 상호 비교하여 분석하였다. 대상지역의 건물주변을 중심으로 28개의 검사점을 선정하여 초기 항공레이저측량 DSM의 표고값과 건물을 제거한 최종 DEM과의 표고오차 비교결과는 표 3과 같다. 최대 0.27m의 표고오차를 보이는 지점도 있었으나 전체적인 표준오차는 $\pm 0.065\text{m}$ 로서, 본 연구에서 활용한 항공레이저측량 장비의 허용오차인 $\pm 0.15\text{m}$ 를 고려할 때 상당히 정확한 결과임을 알 수 있다. 평균필터기법을 적용하여 낮은 표준오차를 확보할 수 있었던 이유로는 본 연구대상지가 경사가 매우 완만한 도시지역으로 구성되어 있어 건물주변의 표고변화의 영향이 상대적으로 작게 반영된 것으로 해석되며, 따라서 경사가 완만한 도시지역에서의 건물제거 및 DEM 제작에 평균필터기법이 매우 효과적임을 알 수 있었다. 그러나, 기복변화가 심한 지역에서는 건물좌우의 표고변화가 서로 큰 차이를 보이므로 평균필터기법에 의한 오차가 상당부분 전파될 것으로 예상되며 향후 연구에서는 지형특성에 따른 효과적인 필터선정 연구가 필요할 것으로 판단된다.

TABLE 3. 28개 임의점에 대한 표고값 비교결과

(단위:m)

초기 DSM	최종 DEM	표고오차	초기 DSM	최종 DEM	표고오차
20.64	20.80	0.16	19.63	19.72	0.10
21.44	21.56	0.12	20.62	20.52	-0.10
21.53	21.59	0.06	21.98	21.89	-0.09
20.63	20.75	0.12	21.24	21.07	-0.17
20.16	20.30	0.13	21.30	21.56	0.27
22.14	22.02	-0.12	21.52	21.50	-0.03
21.46	21.29	-0.17	21.59	21.62	0.03
21.57	21.78	0.21	20.99	21.14	0.15
21.54	21.66	0.12	21.19	21.12	-0.07
21.30	21.49	0.19	19.45	19.51	0.06
19.78	19.93	0.16	19.35	19.47	0.12
21.12	21.31	0.19	19.24	19.24	-0.01
21.37	21.25	-0.12	19.92	19.87	-0.05
21.35	21.37	0.02	22.30	22.52	0.22

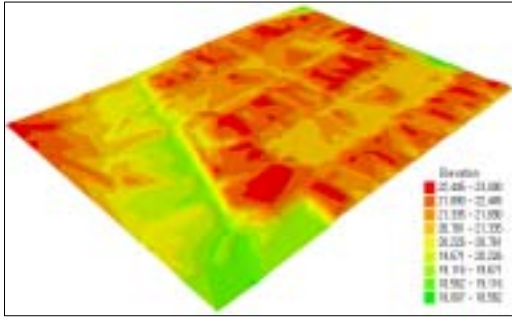



FIGURE 13. 대상지역에 대한 최종 DEM

결론

본 연구는 항공레이저측량을 통하여 취득된 자료를 이용하여 생성된 DSM으로부터 건물 등의 지형지물을 제거하여 지면정보를 추출하는 기법을 제시하였으며 경기도 구리시 일부지역을 연구대상지로 선정하여 분석한 결과, 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

1. 항공레이저측량을 이용하여 구축한 DSM 자료에 대해 다양한 크기의 평균필터를 적용하여 표준편차 변화율을 분석함으로써 대상지역내 DEM을 효과적으로 추출하기 위한 최적 필터크기를 결정할 수 있었다.
2. 최종 생성된 DEM의 정확도를 평가하기 위해 28개 검사점을 선정하여 항공레이저측량 원시 DSM과 비교한 표준오차는 $\pm 0.065m$ 로 나타났으며, 이러한 결과는 항공레이저측량 장비의 허용오차인 $\pm 0.15m$ 를 볼때 매우 낮은 표준오차임을 알 수 있었다.
3. 평균필터를 적용하여 얻은 낮은 표준오차 결과를 볼 때, 경사가 완만하여 건물주변의 표고변화가 상대적으로 적게 나타나는 도시 지역에서는 평균필터기법이 DEM을 생성하는데 매우 효과적임을 알 수 있었다. 

참고문헌

김형태. 2000. GIS 건물레이어 자동구축을 위한 Lidar 데이터와 항공사진의 융합. 서울대학교 대학원 박사학위논문. 103쪽.

이근상, 고덕구, 조기성. 2003. 항공레이저측량 자료를 이용한 시가지 건축밀도 평가에 관한 연구. 한국지리정보학회지 6(3):95-106.

정동기, 김원석, 김성삼, 유환희. 2005. LiDAR 자료로부터 건물 추출 및 3차원 복원. 한국측량학회 춘계학술발표회 논문집, 229-235쪽.

좌윤석. 2003. 항공레이저 스캐닝 데이터를 이용한 건물 자동추출에 관한 연구. 인하대학교 대학원 석사학위논문. 43쪽.

최연웅, 조기성. 2005. 도시지역 LiDAR DSM으로부터 DEM추출기법 연구. 한국지형공간정보학회논문집 13(1):19-25.

최연웅. 2005. LiDAR 자료로부터 Entropy 이론을 이용한 건물 추출기법 연구. 전북대학교 대학원 박사학위논문. 96쪽.

최형일, 이근수, 이양원. 1997. 영상처리 이론과 실제, 홍릉과학출판사. 서울.

Haithcoat, Timothy L., Wenbo Song, James D. Hipple. 2001. Building footprint extraction and 3-D reconstruction from LIDAR data. IEEE/ISPRS Joint Workshop on Remote Sensing and Data Fusion over Urban Areas. Rome. Italy.74-78Ppp

Jaafar, J. and G. Priestnall. 1999. A Critical evaluation of the potential of automated building height extraction from stereo imagery for land use change detection. In: B. Gittings(ed.). Innovations in GIS 6, Taylor and Francis, London, UK, pp.213-222.

Jaafar, J., G. Priestnall, P. M. Mather and C. A. Vieira. 1999. Construction of DEM from LiDAR DSM using morphological filtering,

conventional statistical neural networks, Earth Observation: From Data to Information. Proceedings of the 25th International Conference of the Remote Sensing Society (RSS'99). University of Wales at Cardiff and Swansea. Nottingham, UK. pp.299-306.

Priestnall, G., J. Jaafar and A. Duncan. 2000. Extraction urban features from LiDAR digital surface models. Computers, Environment and Urban Systems 24:65-78

Zheng Wang. 1999. Surface reconstruction for object recognition. Ph. D. Thesis, The Ohio State University, Columbus, Ohio, USA, 125pp. 