

산림지형 모델링을 위한 항공 라이다 데이터의 지면점 필터링 비교분석과 정확도 개선

Comparative Analysis and Accuracy Improvement on Ground Point Filtering of Airborne LIDAR Data for Forest Terrain Modeling

황세란¹⁾ · 이임평²⁾

Hwang, Seran · Lee, Impyeong

Abstract

Airborne LIDAR system, utilized in various forest studies, provides efficiently spatial information about vertical structures of forest areas. The tree height is one of the most essential measurements to derive forest information such as biomass, which can be estimated from the forest terrain model. As the terrain model is generated by the interpolation of ground points extracted from LIDAR data, filtering methods with high reliability to classify reliably the ground points are required. In this paper, we applied three representative filtering methods to forest LIDAR data with diverse characteristics, measured the errors and performance of these methods, and analyzed the causes of the errors. Based on their complementary characteristics derived from the analysis results, we have attempted to combine the results and checked the performance improvement. In most test areas, the convergence method showed the satisfactory results, where the filtering performance were improved more than 10% in maximum. Also, we have generated DTM using the classified ground points and compared with the verification data. The DTM retains about 17cm RMSE, which can be sufficiently utilized for the derivation of forest information.

Keywords: Forest, LIDAR, Filtering, Ground Point, DTM, Convergence

초 록

항공라이다시스템은 산림영역의 수직구조에 대한 공간정보를 효율적으로 제공하므로 다양한 산림연구에 이용되어왔다. 수목의 고도는 산림생체량과 같은 산림정보를 유추하기 위한 필수적인 요소로 산림의 지형을 모델링하여 추정할 수 있다. 산림지형은 산림영역에서 획득된 라이다데이터에서 추출된 지면점을 보간하여 추정되므로 지면점 분류를 위한 신뢰성 높은 필터링 방법이 요구된다. 이에 본 연구는 다양한 특성을 갖는 산림영역의 라이다데이터에 세 종류의 대표적인 필터링 방법들을 적용하여 지면점 분류오차 및 필터링 성능을 정량적으로 결정하고 오차발생 원인을 분석하였다. 분석한 결과로 나타난 상호보완적인 특성에 착안하여 개별 필터링의 결과를 융합하여 성능개선의 여부를 확인하였다. 융합을 통해 대상지역의 특성에 따라서 다르지만 성능지표가 최대 10% 이상 개선되어 모든 지역에서 안정적으로 양호한 성능을 보였다. 또한 분류된 지면점으로부터 DTM을 생성하고 검증 데이터와 비교한 결과 약 17 cm 내외의 RMS 오차를 보였으며, 이는 산림정보 추출에 충분히 활용 가능한 것으로 판단된다.

핵심어 : 산림, 라이다, 필터링, 지면점, 수치지면모델, 융합

1) 서울시립대학교 공간정보공학과 석사과정(E-mail : serany@uos.ac.kr)

2) 교신저자, 정회원, 서울시립대학교 공간정보공학과 부교수(E-mail : iplee@uos.ac.kr)

1. 서론

항공라이다시스템은 넓은 산림영역에 대해 신뢰성 높은 고밀도의 3차원 공간정보를 효율적으로 제공한다. 라이다데이터를 이용한 산림연구는 개별수목탐지, 수목의 고도추정, 수목생체량(biomass) 및 재적(volume)추정 등 다양하게 수행되고 있다. 라이다데이터를 이용하여 산림자원을 보다 정밀하게 측정하기 위해서는 산림지형 모델링이 선행되어야한다. 산림 지형모델(DTM, Digital Terrain Model)은 산림영역에서 획득된 라이다데이터에서 분류된 지면점을 보간하여 생성되며, 수목에서 반사된 라이다데이터에서 산림지형모델을 차분한 후 다양한 데이터처리 방법을 적용하여 개별수목을 탐지하거나 평균 수고를 추정하게 된다.

라이다 연구 분야에서 지면점을 분류하는 과정을 필터링이라고 하며 필터링에 관한 연구는 국내외에서 수행되어왔다. 윤정숙 등(2006)은 산림지역의 항공라이다 데이터의 수직구조를 분석하고 필터링 방법을 제시한 바 있다. 이를 위해 수관부와 지면근처에서 반사되는 데이터를 분리하고 지면근처의 점들에 대해 평면근사를 수행하여 지면에 가까운 점들을 지면점으로 분류하였다. 최승식 등(2007)은 높이 차이에 따른 점집합 분할과정을 통해 비지면점을 제거하고 비지면점에 포함된 지면점을 재분류하여 지면점으로 복원시키는 필터링 방법을 연구하였으며 다양한 지형에서 좋은 결과를 보였으나 경사진 산림영역에서 오차가 가장 높게 발생하였다.

필터링 연구가 활발히 진행되어 온 국외 연구사례는 필터링 원리를 고려하여 TIN(triangulated irregular network)기반 필터링, robust 추정법 기반의 필터링 및 morphology 형태의 필터링으로 분류하였다(Kobler 등, 2007). TIN 기반 필터링은 초기 TIN을 생성하여 초기 지면을 추정하고 이로부터 지면점을 점진적으로 추가하면서 지면점의 밀도를 높여나가는 방법이다. Axelsson(2000)이 제안한 필터링 방법은 초기 TIN면에서 임계거리와 각을 만족하는 점들을 지면점으로 추가하고 추가되는 지면점이 없을 때까지 TIN과 임계값을 재계산하면서 필터링을 수행한다. Shon 등(2002)은 초기 TIN을 구성하고 버퍼범위 및 경사각 등의 임계값을 고려하면서 지면의 상하방향에 대하여 점진적으로 지면점을 분류하였다.

Robust 추정법 기반의 필터링은 근사표면에 대한 잔차를 고려한 반복적인 Robust 추정을 수행하며 이상점에

강인한 방법이다. Kraus 등(1998)은 초기 지표면을 생성하고 잔차에 따른 가중을 적용하여 비지면점을 제외시켜나가는 robust 보간 필터링 방법을 발표하였으며, Elmqvist(2001)은 라이다데이터를 보간한 래스터영상에 등고선탐지를 위해 active contour model 이론에 기반한 필터링을 수행하였다.

Morphology 필터링은 robust 원리의 필터링과는 달리 검사점에 인접한 점들에 대해 지역적인 연산을 수행하여 지면점 여부를 판단한다. Kilian 등(1996)은 이동 윈도우를 설정하고 오픈링(opening)연산을 수행하여 돌출부분을 제거하고 밴드범위 내에 포함된 점들을 지면점으로 분류하였다. Zhang 등(2003)은 이동 윈도우 크기 변경 문제점을 개선하기 위해 윈도우를 선형으로 설정하고 이를 점점 증가시키는 필터링 방법을 연구하였으며 Vosselman(2000)은 검사점과 인접점들간의 거리 및 경사각으로 계산된 허용 높이값과 실제 높이 차이를 비교하는 경사기반의 필터링을 적용하여 지면점을 분류하였다.

이와 같은 연구 외에도 다양한 필터링 방법이 발표되어왔으며 이에 유환희 등(2005)은 여러 필터링 방법을 건물영역에 적용하여 필터링에 따른 지면점 분류결과와 DTMs 생성 정확도를 평가하였다. Sithole 등(2004)은 다양한 환경에서 획득된 라이다데이터에 대해 8종류의 필터링 방법들을 적용하고 그 결과를 비교분석하는 연구를 수행하였으나 산림영역에 대한 실험과 결과분석은 다른 환경에 비해 비교적 간략하게 수행되었다. 산림영역 필터링 시 발생하는 오차위치 및 원인 등에 관한 다양한 분석을 수행한다면 산림영역에 적합한 필터링 보완방법과 보다 정확도 높은 산림지형을 모델링하는데 도움이 될 것이다.

본 연구에서는 원리에 따라 분류된 필터링방법 중 Axelsson(2000), Kraus 등(1998) 및 Vosselman(2000)의 필터링 알고리즘을 분석하였다. 또한 Matlab R2009a를 이용하여 알고리즘을 구현하고 그 결과를 그림으로 나타내었다. Axelsson의 필터링은 라이다데이터처리 상용 S/W인 Terra Scan에 적용된 방법이며, Kraus의 필터링은 산림영역 필터링을 위해 고안된 방법이다. Vosselman의 필터링은 간단한 원리를 가지면서 지형에 따른 유연한 경사각 적용이 가능함에 따라(Sithole, 2001) 복잡한 산림지형에 효과적인 결과를 보일 것으로 예상되어 본 연구에서는 이 세 가지 필터링 방법을 선택하였다. 연구의 목적은 산림지형에 따른 필터링 결과를 정량적으로 분석

하여 오차발생 원인을 파악하고 이를 보완할 수 있는 방법을 제안하는 것이다. 또한 필터링으로 분류된 지면점으로 부터 산림지형모델을 생성하고 현장측량으로부터 측정된 지면높이를 이용하여 이를 검증한다.

2. 필터링 원리

2.1. Axelsson 필터링

본 연구에서는 Axelsson(2000)이 제안한 adaptive TIN 필터링의 원리를 바탕으로 필터링을 구현하였다. 필터링의 원리는 다음과 같다. 먼저 전체 데이터영역에 대해 지면점이 포함되도록 격자경계를 설정하고 각 격자 내에 포함된 라이다데이터의 최소값으로부터 초기 TIN을 생성한다. 이때 격자 내의 최소 높이값을 갖는 데이터는 지형에서 반사된 점이어야 하므로 이를 고려하여 격자 크기를 결정한다. TIN을 구성하는 점 이외의 데이터들에 대하여 TIN면과 꼭지점에 대한 임계조건을 적용하여 지면점 여부를 판단한다. TIN근처의 점들(A,B)이 거리(H)와 각(α) 임계값을 만족하는 경우 검사점을 지면점으로 분류하며(B) 이 과정이 완료된 후 지면점으로 분류된 모든 점들로부터 TIN을 재생성한다(그림 1). 동시에 지면점으로 추가된 거리 및 각에 대한 히스토그램의 중간값을 이용하여 임계값을 재계산한다. 추가되는 지면점이 없을 때 까지 TIN과 임계값을 재계산하며 반복적인 지면점을 분류과정으로부터 TIN은 지형을 점차 세밀하게 추정하며 임계값은 점차 감소하게 된다.

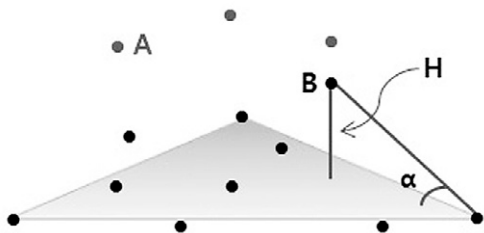


그림 1. Axelsson 필터링 원리

2.2. Kraus 필터링

Kraus의 필터링은 근사표면의 일정범위 내에서 지면점일 가능성이 클수록 높은 가중을 주면서 표면을 반복 추정하고 이로부터 지면점을 분류하는 방법이다(Kraus 등, 1998). 산림영역에서 획득된 라이다데이터를 격자로 분할한 후 각 격자 내에 포함된 데이터에 동일한 가중

로 최소제곱 근사를 수행하여 초기표면을 추정한다. 초기표면을 생성한 후 표면 윗부분에 존재하는 점들에는 낮은 가중을 주고, 표면 아랫부분의 점들에는 높은 가중을 부여하면서 최소제곱 근사를 반복 수행한다(그림 2). 근사표면을 추정할 때 적용되는 잔차 v 에 대한 가중 그래프는 그림 3과 같다. 지면점을 분류하기 위한 가중범위($g \sim w$)를 결정하고 g 이하의 잔차를 갖는 점들은 지면점으로, w 이상의 잔차를 갖는 점들은 비지면점으로 분류된다. 가중범위 사이에 분포하는 점들에는 잔차에 따른 가중을 부여하고 이에 따라 근사표면을 반복 추정한다.

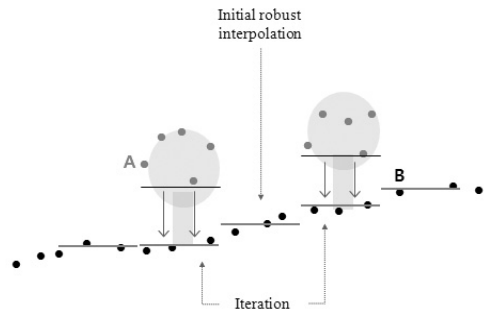


그림 2. Kraus & Pfeifer 필터링 원리

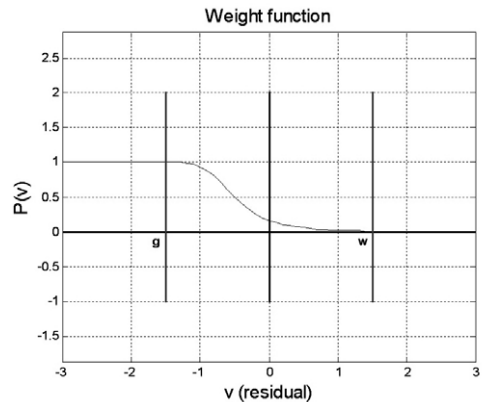


그림 3. 가중함수 그래프 (Kraus와 Pfeifer, 1998)

2.3. Vosselman 필터링

Vosselman의 필터링은 검사점에 인접한 점들과의 거리, 경사각 등의 변수로부터 지면점 여부를 결정하는 방법이다(Vosselman, 2000). 검사점에 대해 인접한 점과의 실제 높이차와 고정된 경사각으로부터 계산된 높이에 대한 임계값을 비교하여 임계값보다 큰 높이차를 갖는 인접점이 존재하는 경우 검사점은 비지면점으로 분류된다(그림 4). 비교적 간단한 방법으로 지면점을 분류하지만

임계값으로 설정되는 경사각에 의해 분류 정확도가 크게 달라질 수 있다. 이에 Sithole(2001)은 실험영역에 대한 경사맵(slope map)을 이용하여 지형지물의 특징에 따라 다른 경사각을 적용하여 유연한 필터링을 수행하였으나 이는 사전에 지형에 관한 데이터가 있어야 한다는 단점이 있다. 본 연구에서는 산림영역에서 획득된 데이터의 수직분포를 분석하여 지형 및 경사를 파악하고 이로부터 지형별로 경사 임계값을 결정하여 필터링에 적용한다.

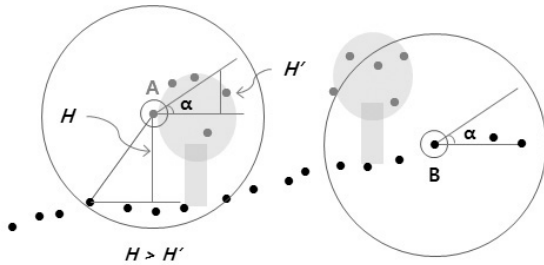


그림 4. Vosselman 필터링 원리

3. 실험지역 및 데이터

3.1. 실험지역 및 데이터

다양한 산림환경에서 필터링의 성능을 실험하기 위해 ISPRS에서 제공하고 있는 데이터(Sithole 등, 2004)와 천안지역에서 취득한 라이다데이터를 이용하였다. ISPRS 데이터는 국내의 여러 연구사례에서 필터링 성능검증을 위해 사용되어왔으며 이에 객관적인 실험수행과 결과도출이 가능하다. 데이터는 독일 교외지역에서 획득되었으며 강, 경사지, 산림, 건물 등 다양한 지형지물 요소를 포함하고 있다. 천안지역 데이터는 2009년 10월 8일에 획득되었으며 산림영역 데이터를 분할하여 실험에 이용하였다. 각 실험데이터 내에서 수목이 분포하는 경사지, 계곡지형 및 지면점 비율이 낮은 6개의 영역을 추출하여 필터링 실험을 수행하였다. 실험영역에서 획득된 라이다데이터는 그림 5와 같다. ISPRS데이터에서는 수목이 주로 경사지에 분포하고 있다. Site 1은 약 27도의 경사를

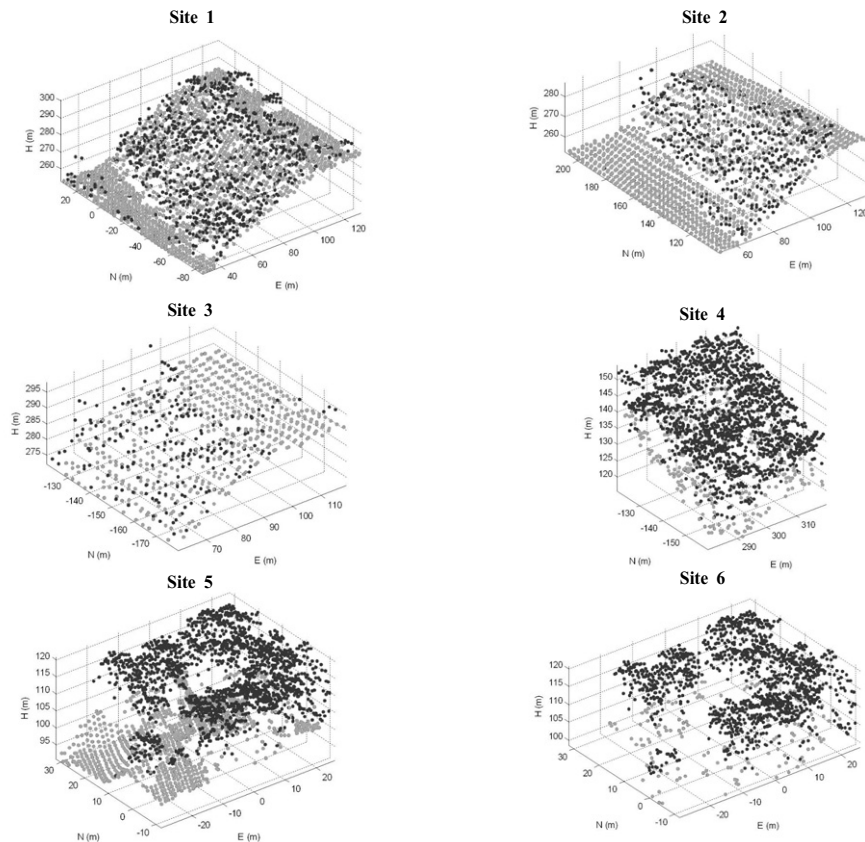


그림 5. 다양한 산림환경에서 취득된 라이다데이터

가진 지형이며 언덕 상단부분에 분포하는 수목의 밀도가 비교적 높다. Site 2는 최대 약 32도의 다양한 경사를 보이며 지면점의 밀도가 Site 1에 비해 높고, Site 3은 완만한 경사에 가운데 골이 있는 계곡지형이다. Site 4는 천안 지역으로 약 35도의 경사를 가졌으며 지형이 거칠고 수목의 밀도가 높아 지면으로 투과되는 지면점의 비율이 약 16%에 불과하다. Site 5와 6은 동일지역이나, Site 5는 수목이 없는 곡선의 급경사를 포함하며 수목이 분포하는 지형은 비교적 완만하다. Site 6은 Site 5를 4 m 간격의 격자로 분할한 후 지면점의 밀도가 0.375개/m²(격자당 6개의 지면점) 이하인 83개의 격자가 차지하는 영역만을 포함한다. 이는 지면투과율이 낮고 불규칙한 경우 필터링의 성능을 판단하기 위한 데이터로 동일 영역 내 모든 점에 대한 지면점의 비율이 약 10%로 매우 낮다. 각 실험영역에 대한 데이터 속성은 표 1과 같다.

표 1. 실험지역 데이터

영역	ISPRS 데이터			천안지역 데이터		
	Site 1	Site 2	Site 3	Site 4	Site 5	Site 6
넓이(m ²)	102x120	80x09	58x0	40x0	56x4	83x(4) ²
전체점수	2424	1661	699	2014	2505	1449
지면점수	1582	1262	489	331	866	153
전체점밀도(n/m ²)	0.19	0.19	0.20	1.26	1.02	1.09
지면점밀도(n/m ²)	0.12	0.14	0.14	0.21	0.35	0.12
지면점비율(%)	65.26	75.98	69.96	16.43	34.57	10.56

3.2. 검증 데이터

지면점 분류결과를 정량적으로 분석하기 위해 검증 데이터를 제작하였다. 검증 데이터는 ISPRS에서 필터링 비교를 위해 구축한 방법(Sithole 등, 2004)과 유사하

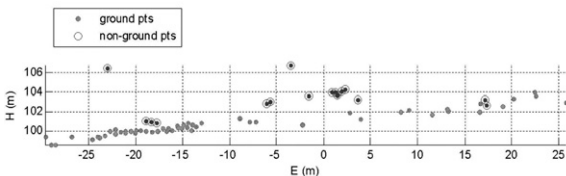


그림 6. 필터링 결과 검증을 위해 분류된 지면점(Site 5)

게 육안으로 지면점 여부를 판단하여 수동으로 분류하였다. 먼저 지면의 최대 높이를 찾고 이보다 높은 비지면점을 제거한다. 제거된 데이터를 일정한 간격(4m)의 스트립으로 분할하고 모든 점들에 번호를 표시한 후 수직 및 수평 분포를 고려하여 비지면점을 분류한다(그림 6).

또한, 필터링으로 분류된 지면점으로부터 생성한 DTM을 검증하기 위해 2011년 10월 7일 현장측량을 수행하여 실험영역에 분포한 30분의 수목을 기준으로 위치와 지면의 높이를 측정하였다(그림 7). GPS기준점을 측정한 후 이로부터 토탈스테이션과 반사경을 이용하여 수목이 위치한 지면의 높이값을 결정하였다. 지상기준점은 산림 외부에서 약 5 cm 이내의 정확도로 2점을 측정하였으며 측정 위치 및 GPS데이터 처리결과는 표 2와 같다.

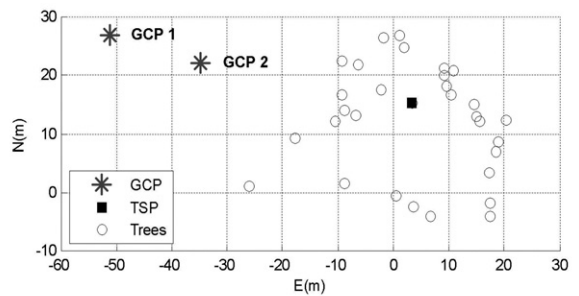


그림 7. GCP, 토탈스테이션 및 지면높이 측정 위치

표 2. GPS 데이터 처리결과

	GCP1	GCP2
위도	36°50'13.07139"N	36°50'12.91530"N
경도	127°07'21.87629"E	127°07'22.53772"E
타원체고(m)	101.8165	101.7616
신뢰도(m)	E-W	-0.0035
	N-S	0.005
	H	0.0034
TM좌표(m)	N	370926.885
	E	210948.844
		370922.134
		210965.264

4. 실험 결과

4.1. 필터링 결과 및 오차분석

본 연구에서는 오분류를 보다 정량적으로 판단하기 위한 Type I, Type II 오차율과 필터링의 분류성능을 판단하기 위한 완전성(completeness)와 정확성(correctness)를 계산하였다. 오차율은 지면점의 정분류와 오분류에 의해 결정되며 분류결과와 종류는 표 3과 같다. True는 지면점과 비지면점을 기준 데이터와 동일하게 분류한 것이며 False는 데이터를 잘못 분류한 경우를 의미한다. 완전성은 기준 데이터에 포함된 실제 지면점 중 필터링으로 분류된 지면점의 비율을 의미하며, 정확성은 필터링으로 분류된 지면점 중 실제 지면점의 비율을 의미한다.

표 3. 필터링 분류결과와 종류

		필터링 결과	
		지면	비지면
기준	지면	True I	False I
	비지면	False II	True II

$$Type\ I = \frac{false1}{true1 + false1} \times 100$$

$$Type\ II = \frac{false2}{true2 + false2} \times 100$$

$$Completeness = \frac{true1}{true1 + false1} \times 100$$

$$Correctness = \frac{true1}{true1 + false2} \times 100$$

표 4. Site 1에 대한 필터링 결과와 오차 및 성능지표

필터링 방법		A	K	V
필터링 결과	지면점 수	1609	1608	1642
	True I	1564	1555	1575
	True II	797	789	775
	False I	18	27	7
	False II	45	53	67
오차율 (%)	Type I	1.14	1.71	0.44
	Type II	5.34	6.29	7.96
	총 오차율	2.60	3.30	3.05
성능 (%)	완전성	98.9	98.2	99.6
	정확성	97.2	96.7	95.9

표 4는 Site 1에 대한 지면점의 수, 분류결과, 이에 따른 오차율과 필터링 성능을 보여준다. 모든 실험영역에 세 개의 필터링을 적용한 결과에 대해 이와 같은 표를 작성하고 오차분포를 표시하여 정성적 및 정량적인 분석을 수행하였다(그림 8, 9, 10). 본 논문의 표 및 결과 분석에서는 각 필터링의 이름을 논문 저자의 첫머리글자를 붙여 A, K 및 V 필터링으로 정의하여 사용하였다.

그림 8은 오차가 비교적 높게 발생한 영역에 대한 필터링 결과를 보여주며 분류된 지면점과 False I (o)과 False 2 (x)의 오차발생 위치를 표시하였다. Site 1에서 V 필터링의 경우 경사지 언덕 상단에서 상당수의 비지면 점들이 지면점으로 분류되면서 Type II 오차율이 7.96%

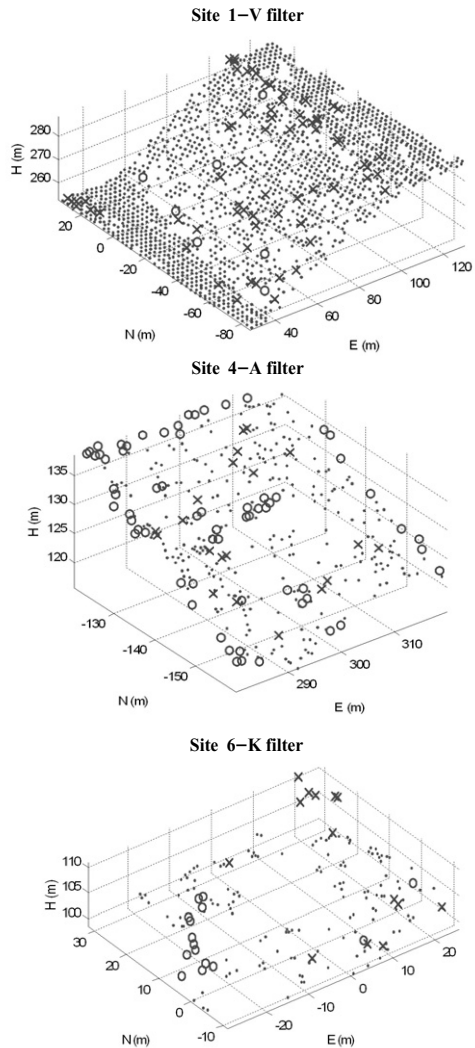


그림 8. False I(o) 및 False II(x) 오차 분포

로 가장 높았다. 이는 언덕 상단부분의 지면점 투과율이 낮아 비지면점을 경사면과 이어진 지면점으로 판단하여 발생한 오차이다. 경사가 크고 굴곡이 많은 Site 4에서는 A 필터링의 Type I 오차율이 19.64%로 크게 발생하였다. 최저점으로부터 초기 TIN면을 생성하여 가장자리에 분포하는 지면점이 TIN면에 포함되지 못하였으며, 굴곡 큰 지형에서 반사된 지면점이 임계값을 만족하지 못하고 비지면점으로 분류되었기 때문이다. 지면점비율이 낮은 Site 6에서는 K 필터의 성능이 비교적 낮게 나타났다. 지면점에 가까울수록 높은 가중을 주며 지형을 추정하기 때문에 지면점 비율이 낮고 불규칙하게 분포하는 경우 필터링 오차가 크게 나타나게 된다. Site 5에서 A와 K 필터링의 Type I 오차율이 약 8%로 유사하게 나타난 반면 V 필터링은 약 1%의 낮은 오차율을 보였다(그림 9, 10). 곡선형태의 급격한 경사영역에서 유연한 경사각을 적용한 V 필터링은 효과적으로 지면점을 분류하였지만 A와 K 필터링은 가장자리 및 경사 상, 하단에서 지면점을 비지면점으로 판단한 오차가 크게 나타났기 때문이다.

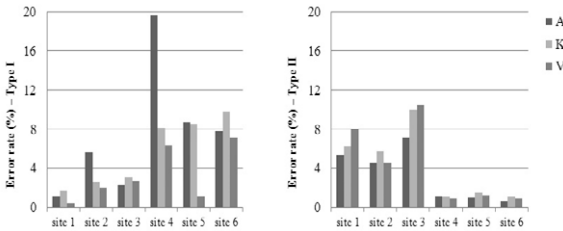


그림 9. 필터링 오차율

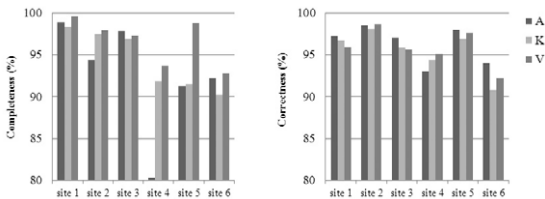


그림 10. 필터링 성능

필터링 결과 ISPRS 데이터(Site 1, 2, 3)는 실제 지면점의 수가 많으면서 수목이 없는 평지가 비교적 넓게 존재하여 True I으로 분류된 점이 많고, True II로 분류된 점이 적다. 이에 ISPRS 데이터의 Type I 오차율은 낮고 Type II 오차율이 높게 나타난 반면 천안지역 데이터는 이와 상반된 경향을 보였다. 필터링 결과를 정성적 및 정량적으로 분석한 결과로부터 알 수 있는 각 필터링들의 장단점

및 특징은 다음과 같다.

A 필터링은 전반적으로 높은 Type I 오차율을 보였으며 특히 굴곡이 많은 Site 4에서는 Type I 오차가 약 20%로 크게 발생하였다. 그러나 두드러진 특징이 없는 경사지형 및 지면점 비율이 낮은 영역(Site 1, 3, 6)에서는 다른 두 필터링에 비해 좋은 성능을 보였다. A 필터링은 최소 높이의 점들로부터 초기 TIN을 생성하기 때문에 최소 높이점으로 선택된 점이 비지면점일 경우 오차율이 높아지게 된다. 그러므로 초기 TIN을 보다 정확하게 생성할 수 있는 방법이 요구된다.

K 필터링은 각 격자내의 점들로부터 근사평면을 생성하게 되는데 격자의 크기를 작게 할 경우 데이터의 가장자리에서 지면점비율이 낮거나 없는 곳의 근사평면이 실제 지면보다 높게 생성되어 오차가 발생한다(Site 6). 또한 지면점 비율이 낮은 것을 고려하여 격자크기를 크게 할 경우 격자보다 작은 굴곡과 급격한 경사를 갖는 부분에서 지면점을 비지면점으로 분류하는 Type I 오차가 크게 발생하게 된다. 따라서 K 필터링은 지형의 특성을 파악한 후 이에 적합한 격자크기를 적용한다면 정확도를 향상시킬 수 있을 것이다.

V 필터링은 다른 필터링에 비해 지면점을 더욱 많이 분류하는 경향을 보인다. V 필터링은 높은 경사각을 설정하면 허용 높이값이 커져 더 많은 지면점을 분류할 수 있지만 동시에 지면점에 가까운 비지면점들도 지면점으로 포함하는 비율이 높아진다는 단점이 있다. 또한 지면점 밀도가 낮아 인접한 점들이 없거나 적은 경우 morphology 특성을 갖는 V 필터링의 성능이 떨어진다. 이에 인접점들의 점밀도가 낮은 경우 인접범위를 점차 증가시키면서 인접점들의 분포를 고려하며 지면점을 분류한다면 문제점을 보완할 수 있을 것이다.

실험결과를 종합하여 볼 때 산림영역 필터링에서 발생하는 오차의 가장 주요한 원인은 수목을 투과하는 지면점 비율이 낮아 필터링 알고리즘의 의도대로 지면점을 분류하는데 한계가 있다는 것이다. 이에 산림연구를 위한 라이다데이터는 가능한 겨울철에 획득되어야 하며 지면점 비율이 낮은 영역의 DTM은 지면점 비율이 높은 영역의 DTM값들로부터 유도되어야 할 것이다.

4.2. 필터링 융합

필터링 오차발생 위치를 정성적으로 분석한 결과 각 필터링 방법이 다른 필터링의 오차를 보완하는 경

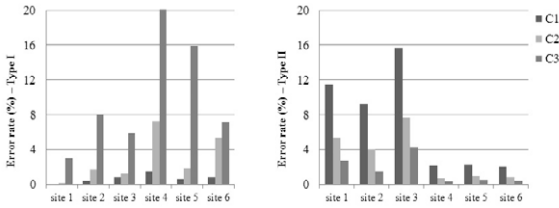


그림 11. 융합방법에 따른 필터링 오차율

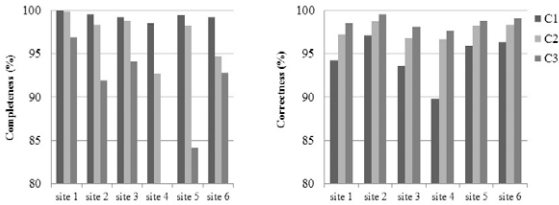


그림 12. 융합방법에 따른 필터링 성능

표 5. 융합 전후 결과 비교

Site	필터	성능 (%)	
		완전성	정확성
1	A	98.9	97.2
	K	98.3	96.7
	V	99.6	95.9
	C2	99.8	97.2
2	A	94.4	98.5
	K	97.4	98.1
	V	97.9	98.6
	C2	98.3	98.7
3	A	97.8	97.0
	K	96.9	95.8
	V	97.3	95.6
	C2	98.8	96.8
4	A	80.4	93.0
	K	91.8	94.4
	V	93.7	95.1
	C2	92.7	96.6
5	A	91.3	98.0
	K	91.5	96.9
	V	98.8	97.6
	C2	98.2	98.2
6	A	92.2	94.0
	K	90.2	90.8
	V	92.8	92.2
	C2	94.7	98.3

향을 보였다. 이에 필터링 방법들이 분류한 결과를 융합하여 오차율 및 성능개선 여부를 분석하였으며 결과는 그림 11 및 12와 같다. 각 필터링 방법으로 분류한 결과들의 융합은 다음과 같은 세 가지 조건으로 수행되었다. 첫째, 적어도 한 가지 방법에서 지면점으로 분류된 경우(C1), 둘째, 세 가지 중 두 가지 방법에서 분류된 경우(C2), 셋째, 모든 필터링에서 지면점으로 분류된 경우(C3)이다. 융합결과 모든 실험영역에서 C1은 Type I 오차율이 낮게 나타난 반면 Type II 오차율은 높게 나타났고 C3는 이와 반대의 결과를 보였다. 이에 상대적으로 효과적인 성능을 보인 C2의 결과를 각 필터링 결과와 비교하였으며, Site 3의 정확성, Site 4, 5의 완전성은 융합 전보다 C2가 약 1% 낮게 나타났다. 이는 각 필터링의 성능 차가 크게 나타날 경우 낮은 성능을 갖는 필터링 결과로 인해 융합 시 성능이 크게 향상되지 못했기 때문이다. 그러나 Site 1, 2, 6에서는 완전성과 정확성이 모두 융합 전보다 높게 나타났으며, 특히 지면점 비율이 낮은 Site 6에서는 융합 후 완전성이 약 2~4%, 정확성이 약 4~8% 향상되었다(표 5).

4.3. DTM 생성 및 검증 결과

각 필터링방법으로 분류된 지면점을 이용하여 DTM을 생성하고 총 30점의 실측지형높이를 이용하여 DTM의 오차를 분석하였다. 현장측정 영역인 Site 5의 좌측은 수목이 분포하지 않은 급경사 지형이며 우측은 완만한 지형이나 수목의 밀도가 높아 지면점 비율이 매우 낮다. 검증데이터는 수목이 분포한 오른쪽 영역에서 취득되었으며 수목의 위치를 기준으로 지면의 높이를 측정하였다. 융합 결과에서 Site 4와 5에서는 A와 K 필터링의 완전성이 V 필터링에 비해 약 7% 낮게 나타나면서 C2의 성능이 V 필터링보다 0.6% 낮게 나타났다. 이에 DTM 검증 결과에서 V 필터링의 지면점으로 생성된 DTM의 RMS가 C2에 비해 낮게 계산된 것으로 보인다(표 6). 각 필터링방법으로 분류된 지면점을 선형 보간하여 생성한 DTM은 그림 13(우)와 같다. DTM검증을 위해 실측높이와 측정위치에 대응되는 DTM의 높이값에 대한 상관관계를 분석한 결과, 결정계수가 $R^2=0.98$ 로 나타났다(그림 13, 좌).

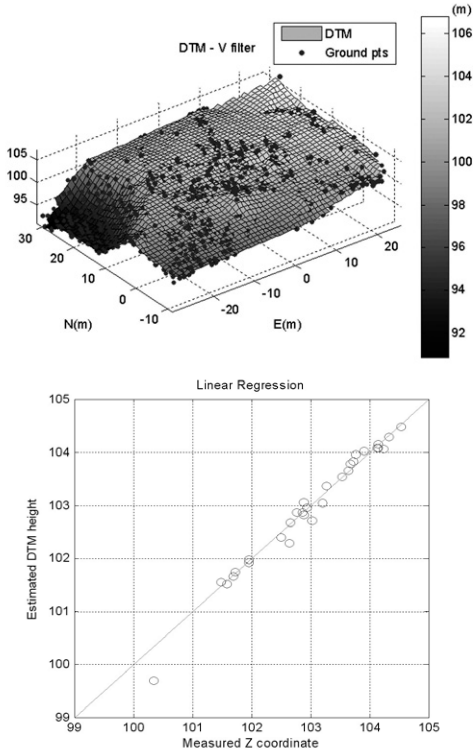


그림 13. 생성된 DTM 및 상관관계 분석결과

표 6. DTM 오차 분석 결과

	DTM 오차 (m)			
	A	K	V	C2
필터				
최소	-0.343	-0.640	-0.640	-0.640
최대	2.12	1.062	0.183	0.183
평균	0.047	-0.031	-0.038	-0.054
Std.	0.403	0.282	0.163	0.169
RMSE	0.410	0.286	0.166	0.172

5. 결론

본 연구에서는 산림영역에서 획득된 라이다데이터의 지면점을 분류하고 산림지형을 보다 정밀하게 모델링하기 위해 세 가지 대표적인 필터링 방법을 적용하여 오차를 정성적 및 정량적으로 분석하였다. 대상지역의 경사도, 굴곡 및 지면점 비율이 필터링 성능에 큰 영향을 미치는 것으로 파악되며, 필터링 방법의 종류에 따라 상호보

완적인 특성을 보이는 것을 알 수 있었다. 지형이 복잡하거나 다른 형태의 지형이 포함된 영역에서는 각 필터링의 성능 차이가 크게 나타났다. 이 때문에 융합 후에도 융합 전 최대 성능의 필터링에 비해 성능이 크게 향상되지 않았으나 융합 전 최소 성능의 필터링과 비교해서는 최대 12.3% 증가하였다. 또한 지면점비율이 낮은 영역(Site 6)에서는 융합 후 두 종류의 성능 지표가 모두 향상되었으며 정확성의 경우 최대 약 8% 개선되었다. 필터링 융합 결과, ISPRS 및 천안지역에서 추출된 6개의 실험지역에서는 전반적으로 양호한 성능 개선이 이루어짐을 확인하였다. 분류된 지면점으로부터 DTM을 생성하고 실측한 고도와 비교하여 검증한 결과를 살펴보면, 상대적으로 V 필터링과 융합 방법(C2)이 우수하였으며 약 17 cm 정도의 RMS 오차를 보였다. 향후 연구로는 필터링 방법의 개선을 위해 개별 필터링 결과에 대해 신뢰도에 기반한 가중을 가지고 융합하거나, SAR 데이터와 같은 이종 센서 데이터와 융합하는 방법의 개발이 필요해 보인다. 또한, 필터링으로 결정된 산림지역의 DTM을 수목의 고도나 생체량과 같은 산림정보 추출에 활용할 예정이다.

감사의 글

본 논문은 공간정보 전문인력 양성사업의 지원과 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(2011-0027398)

참고문헌

유환희, 김성삼, 정동기, 홍재민 (2005), LIDAR 자료를 이용한 DTM 생성 정확도 평가, 한국측량학회지, 한국측량학회, 제 23권, 제 3호, pp. 261-272.

윤정숙, 이규성, 신정일, 우충식 (2006), 산림지역에서의 항공 Lidar 자료의 특성 및 지면점 분리, 대한원격탐사학회지, 대한원격탐사학회, 제 22권, 제 6호, pp. 533-542.

최승식, 송낙현, 조우석 (2007), Airborne LiDAR 필터에 관한 연구, 한국측량학회지, 한국측량학회, 제 25권, 제 1호, pp. 55-62.

Axelsson, P. (2000), DEM Generation from Laser Scanner Data using Adaptive TIN Models, Proc. of 2000 International Archives of Photogrammetry and Remote

- Sensing, Vol. 33-B4, pp. 110-117.
- Kilian, J., Haala, N. and English, M. (1996), Capture and evaluation of airborne laser data, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 31(3), pp. 383-388.
- Kobler, A., Pfeifer, N., Ogrinc, P., Ljupco, T., Ostir, K. and Dzeroski, S (2007), Repetitive interpolation: A robust algorithm for DTM generation from Aerial Laser Scanner Data in forested terrain, *Remote Sensing of Environment*, vol. 108, pp. 9-23.
- Kraus, K. and N. Pfeifer (1998), Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 53, pp. 193-203.
- Sithole, G. (2001), Filtering of laser altimetry data using a slope adaptive filter, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 34(3/W4), pp. 203-210.
- Sithole, G. and Vosselman, G. (2004), Experimental comparison of filter algorithms for bare Earth extraction from airborne laser scanning point clouds, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 59, pp. 85-101.
- Sohn, G. and Dowman, I. (2002), Terrain surface reconstruction by the use of tetrahedron model with the MDL criterion, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 34(3A), pp. 336-344.
- Vosselman, G. (2000), Slope based filtering of laser altimetry data, *Proc. of 2000 International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 33-B3/2, pp. 935-942.
- Zhang, K., Chen, S., Whitman, D., Shyu, M., Yan, J. and Zhang, C. (2003), A progressive morphological filter for removing nonground measurements from airborne LIDAR data, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 41, No. 4, pp. 872-882.

(접수일 2011. 11. 30, 심사일 2011. 12. 21, 심사완료일 2011. 12. 22)