

Full waveform LiDAR의 높이 정확도 비교 분석

Comparative study for height accuracy of Full waveform LiDAR data

류중희¹⁾ · 이재환²⁾ · 고승범³⁾ · 김백석⁴⁾ · 서해수⁵⁾

Ryu, Joong Hi · Lee, Jae Hwan · Koh, Seung Bum · Kim, Baek Seok · Seo, Hae Soo

Abstract

There are many previous researches such as verification of accuracy, application, and change detection of discrete return LiDAR data, but no researches for full waveform LiDAR data. In this study, we selected the forest area and urban area as case study areas and compared the height accuracy of full waveform LiDAR data with field surveying data. As a result, we got an RMSE of 3.1cm in urban area, 4.7cm in forest area, and it is verified that height accuracy of full waveform LiDAR is high. We think that it is very usefull in aerial photogrammetry.

Keywords : full waveform LiDAR, discrete return LiDAR, Surveying data, height Accuracy

초 록

기존의 LiDAR 데이터에 대한 정확도 검증, 적용성 검토, 변화탐지 등에 많은 연구 논문이 발표 되었으나 주된 LiDAR 데이터의 형태는 discrete return LiDAR의 형태로 국한되어 full waveform LiDAR 데이터에 대한 연구는 미비한 상태이다. 따라서 본 연구에서는 full waveform LiDAR 데이터를 이용하여 연구대상 지역을 산림지역과 도심지역으로 현지 실측 측량 데이터를 이용하여 정확도를 비교 분석하였다. 그 결과 도심지역의 RMSE는 3.1cm, 산림지역의 RMSE는 4.7cm로 나타났으며, full waveform LiDAR의 고도 위치 정확도가 매우 높은 것으로 검증되었다. 항공 분야에서 full waveform LiDAR 장비의 활용가능성이 매우 높은 것으로 판단된다.

핵심어 : full waveform LiDAR, discrete return LiDAR, 측량 자료, 고도 정확도

1. 서 론

최근 고정밀 측량기술과 정보통신기술이 발전함에 따라 다양한 공간정보 자료를 취득할 수 있게 되었다. 고 정밀로 발전된 측량 기술은 국한된 영역에서의 활용이 아닌 우리 삶의 공간정보 전 영역에 활용되고 있으며, 특히 항공 LiDAR 측량은 신속하고 정확하게 지형정보 구축의 중요한 수단으로 각광 받고 있다. 항공 LiDAR는 정밀한 수치 표고 모델(DEM)의 생성이 가능하여 수치지도의 등고

선 등 고도정보 구축에 활용되고 있으며(윤희천 등 2006), 수치지도 수정 및 제작, 토목설계, 재해 환경 모니터링, 건설 및 SOC, 실 설계 재현분야 등 사회 각 분야에 활용성 높은 공간 정보로 부각되고 있다. 항공 LiDAR는 높은 정밀도를 가지고 있으며, 기존의 항공측량과 다른 형태의 포인트 데이터로 자료를 획득하기 때문에 이에 대한 정확도를 검증하기 위해 다양한 연구가 진행되고 있다. 유환희 등(2005)은 필터링을 이용하여 지면과 비지면점을 추출하기 위한 방법을 제시하고, 고층 아파트지역과 저층 주거

1) 정회원 · 삼아항업(주) GIS기술연구소장 전무이사(E-mail:jhryu1957@samah.com)
2) 정회원 · 삼아항업(주) GIS기술연구소 책임연구원(E-mail:jaehwan.lee@samah.com)
3) 삼아항업(주) GIS기술연구소 책임연구원(E-mail:sbkoh@samah.com)
4) 정회원 · 삼아항업(주) GIS기술연구소 연구원(E-mail:bskim1007@samah.com)
5) 정회원 · 서울시립대 공간정보공학과 석사과정(E-mail:hsseo@samah.com)

지역에서의 정확도를 평가함으로써 도시지역의 지형자료인 정밀 DTM 생성에 있어서 LiDAR 자료의 활용 가능성을 검증하였다. 위광재 등(2006)은 LiDAR 데이터의 정확도를 수평과 수직으로 구분하여 정량적으로 위치 정확도를 검증하여 대축적 DEM 구축에 LiDAR를 매우 유용하게 활용할 수 있음을 제시하였고, 이동천 등(2007)은 수치지도의 원래 등고선과 model key points로 생성된 등고선을 비교 분석하여 progressive sampling 결과에 의한 다중해상도 DTM이 데이터 처리에 효과적임을 입증하였다. 김용석 등(2008)은 LiDAR 데이터와 항공사진, 수치지도를 이용하여 지형 지물의 위치정확도를 분석하였다. 이병길 등(2009)은 수목이 있는 지역과 인접한 내대지를 포함한 지역을 선정하여 LiDAR 측량성과와 GPS 측량성과를 비교하여 산림지역의 환경적 요소에 따른 LiDAR 데이터 취득 시기에 따른 정확성 고도화에 대한 방안을 제시하였다. 이임평 등(2010)은 시뮬레이션을 통해 full waveform LiDAR 시스템에 취득되는 반사파형을 모의 생성하고 이를 통해 레이저빔의 이동거리와 시간, 에너지 변화량을 계산하였으며 이를 통해 모의 객체모델에 적용하여 효용성을 입증하였다. 이와 같이 LiDAR 데이터에 대한 정확도 검증, 적용성 검토, 변화탐지 등에 많은 연구 논문이 발표되었으나 주된 LiDAR 데이터의 형태는 discrete return 방식의 형태로 국한되어 full waveform LiDAR 데이터에 대한 연구는 미비한 상태이다. 따라서 본 연구에서는 연구대상 지역의 현지 실측 측량 데이터를 이용하여 full waveform LiDAR 데이터의 고도 값과 수치지도(1:1,000)의 고도값에 대한 정확도를 비교 분석하였다.

2. Full waveform LiDAR

최근 항공사진측량, 수치지도 등을 이용한 수치표고자료 획득 기법에 비해 높은 정확도와 세밀한 밀도를 가지고 있어 3차원 모델링에 필요한 높이정보를 제공하는 LiDAR는 좁은 수신권에 대해 측정하는 discrete return 방식과, 연속 파형을 기록해서 비교적 넓은 수신권에 대해 레이저 빔이 도달하는 경로에 따라 얻어지는 대상물의 특성화된 파형으로 데이터를 처리하는 full waveform 방식으로 구분된다. 본 연구에 적용된 full waveform LiDAR는 단일 주파로 많은 파형 정보를 취득할 수 있는데 이것은 처음 발생된 펄스와 같은 단일 모드이거나 각 표면으로부터 반사된 다수의 펄스로 구성된 복잡한 파형일 수 있다. 다시 말해서 도심지, 농업지역과 같은 일정한 패턴의 연속

성을 지닌 평탄한 지역에서는 단순한 형태를 나타내고, 식생이 분포하는 산림지역에서는 복잡한 형태로 나타나게 된다. 표 1은 연구대상지역에서 단일 펄스(단일 주사)로 취득된 원시데이터(10포인트)에 대한 3차원 공간 위치 정보를 나타낸 것이다.

표 1. 단일펄스로 취득된 원시데이터 3차원 위치정보

Time	X	Y	Z
535484.925	3162755.033	3939620.362	3880256.553
535484.925	3162772.703	3939617.563	3880255.189
535484.925	3162770.864	3939615.354	3880224.112
535484.925	3162768.293	3939612.264	3880222.607
535484.925	3162767.288	3939611.058	3880222.019
535484.925	3162766.425	3939610.021	3880221.514
535484.925	3162800.996	3939651.553	3880241.753
535484.925	3162799.776	3939650.087	3880241.039
535484.925	3162789.880	3939649.011	3880240.514
535484.925	3162792.751	3939641.648	3880236.926

full waveform LiDAR 데이터 처리는 각 펄스에 취득되어 오는 peaks 수를 최대화 하여 수신 펄스의 매개공식으로 구성되어진다. peaks의 최대 값으로부터 취득된 함수 범위값과 3차원 points가 결정되는데 이것은 같은 시간때의 펄스 속성값으로 계산되어진다. 다시 말해서 펄스 분석으로 구성된 f_x , 레이저 빔 경로에 따른 서로 다른 개체 구성요소의 특성화 함수 $f_j(x)$ 는 서로 상관관계를 갖는다.

$$y = f(x) = \sum_{j=1}^n f_j(x) \tag{1}$$

각 모드의 위치는 수직 방향으로 반사표면의 위치를 알아내는데 사용된다. 이때 분석을 단순화하기 위해 펄스 모양이 가우시안 분포를 따른다고 가정하고 다변량 가우시안 분포를 이용하여 리턴파장을 분석하고 있다.

$$\begin{aligned}
 f_{G,j}(x) &= a_j \exp\left(-\frac{(x-\mu_j)^2}{2\sigma_j^2}\right) \\
 f_{L,j}(x) &= a_j \exp\left(-\frac{(\ln(x-s_j)-\mu_j)^2}{2\sigma_j^2}\right) \\
 f_{GG,j}(x) &= a_j \exp\left(-\frac{[x-\mu_j]_{a_j}^2}{2\sigma_j^2}\right)
 \end{aligned} \tag{2}$$

여기서 $f_G(x)$ 는 가우시안 함수, $f_L(x)$ 는 log 가우시안 함수, $f_{GG}(x)$ 는 generalized 가우시안 함수를 의미한다.

3. 실험 데이터 취득

3.1 연구 대상 지역선정

본 연구는 full waveform LiDAR 데이터를 수치지도와 현지 실측 측량 데이터와의 비교를 통한 정확도 검증이다. 연구대상지역은 크게 도심지역과 산림지역으로 나눠 분석하였다. 먼저 도심지역 조건에 적합한 지역으로 주변 상가 및 아파트 단지, 공장 등과 같은 큰 건물들을 비롯하여 낮은 구릉지대와 적정 높이의 산지도 분포되어 있는 천안시 일원으로 선정하였다. 표고 100m이하가 전체면적의 49.8%인 316.7km²이고, 300m 이상이 7.5%인 47.671km²에 달하고 경사도는 중심부의 태조산, 흑성산, 동측의 만근산, 서측의 광덕산, 망경산 일대가 25°이상의 급경사를 형성하고 있고, 그 외 지역은 대부분 15°이내의 비교적 평탄한 지형이다. 또한 산림지역 조건에 적합한 지역으로 높이 832m, 총연장 13km, 강릉에서 서쪽으로 17km 정도 떨어져 있으며, 영동과 영서를 연결하는 관문으로 황병산, 선

자령, 노인봉, 발왕산에 둘러싸인 고위평탄면이 강릉시 성산면의 대관령 일원으로 선정하였다. 그림1은 연구 대상지역의 50cm급 항공영상이다.

3.2 LiDAR 데이터 취득

항공 LiDAR 시스템은 항공기에 탑재된 레이저 센서의 레이저 펄스를 지표면에 향해 주사하여 지표면에 도달 시간과 반사되어 되돌아오는 레이저 펄스의 시간차를 관측함으로써 지표면에 대한 고 정밀의 3차원 공간좌표 (X, Y, Z)를 획득 할 수 있다. 레이저 센서와 함께 항공 LiDAR 시스템에 탑재된 GPS와 IMU는 지표면에 반사되어 되돌아오는 레이저 펄스의 지표상의 위치를 정확하게 계산하기 위한 항공기의 위치와 비행자세에 관한 정보를 얻는데 사용된다. 도심지역(천안시 일원)과 산림지역(대관령 일원)의 LiDAR 데이터는 2010년 6월과 2010년 11월 각각 IGI사의 LiteMapper 6800 시스템에 의해 취득 되었으며 비행고도는 약 1,000m에서 초당 180kHz의 주사율로 도심지역(천안시 일원)은 중복도 50%, cross 촬영 100%로 산림지역(대관령 일원)은 중복도 50%로 취득하였다. 표 2는 데이터 취득에 사용된 LiDAR의 제원이며, 그림 2는 LiDAR Strip이다.



그림 1. 연구대상지역 항공영상 (상:도심지역, 하:산림지역)

표 2. 항공 LiDAR 제원

Specification		Performance
Flight elevation		1,000m
Accuracy	V	20mm
	H	
Detection method		full waveform
Max. # of recorded		unlimited
Scan Angle		60°
Beam Divergence		0.5mrad
Collected Area	Urban	16km ²
	Forest	35km ²
Collected points	Urban	97,583,595
	Forest	161,197,293
Mean of point density	Urban	6.10points /m ²
	Forest	4.49points /m ²
Intensity capture		16bit

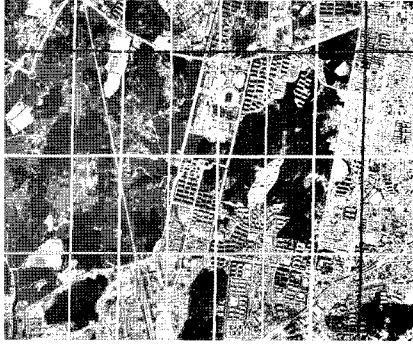


그림 2. LiDAR Strip
(상:도심지역, 하:산림지역)

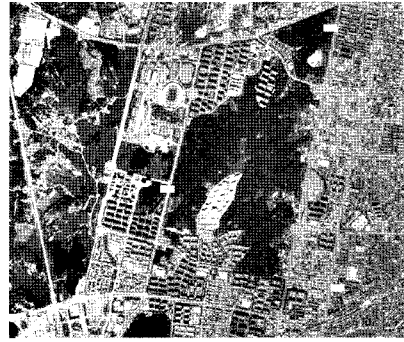
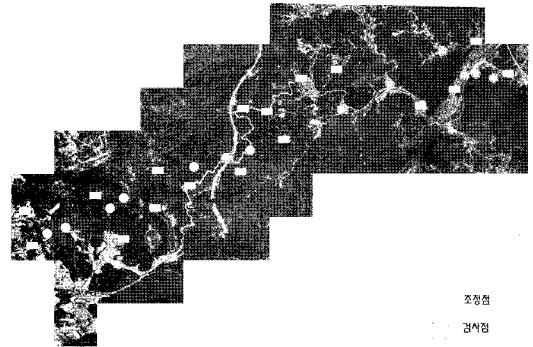
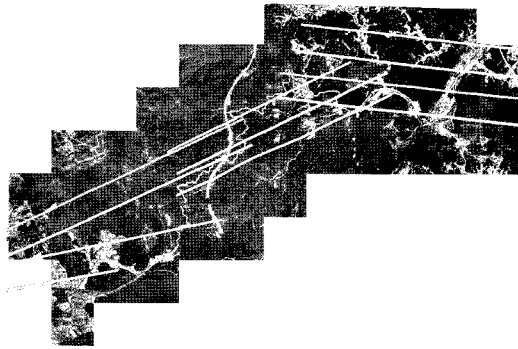


그림 3. 현지측량점 위치 분포
(상:도심지역, 하:산림지역)



3.3 현지측량 및 수치지도

full waveform LiDAR 데이터의 정확도를 분석하기 위하여 현지 4등 삼각점 점의 조서에 명시된 기준점 중 항공레이저측량 규정에 준하는 측량점을 선정하여 측량 하였다. 또한 측량점은 대상지역에 골고루 분포하도록 하였으며 일부는 타원체고의 LiDAR 데이터 정표고 변환점으로 사용하였으며, 일부는 이에 대한 검사점으로 활용되었다. 그림3은 조정점과 검사점 분포를 나타낸 것이다. 도심지역(천안시 일원)은 총 5점의 조정점과 10점의 검사점을 사용하였으며, 산림지역(대관령 일원)은 총 17점의 조정점과 13점의 검사점을 사용하였다.

표 3과 표4는 각각의 연구대상지역에 따른 조정점으로 사용한 측량점의 위치정보와 조정량을 나타낸 것이다.

표 3. 조정점 좌표-도심지역(천안시 일원) (단위:m)

No.	X좌표(N)	Y좌표(E)	DZ
1	209177.853	369589.233	-24.160
2	211834.927	369609.703	-24.253
3	209402.983	367032.625	-24.204
4	210232.676	368075.224	-24.219
5	211869.906	367138.797	-24.290

표 4. 조정점 좌표-산림지역(대관령 일원) (단위:m)

No.	X좌표(N)	Y좌표(E)	DZ
1	175289.051	566230.318	-28.066
2	176898.607	566536.969	-28.031
3	177551.648	565570.895	-28.055
4	178303.492	566280.948	-27.998
5	178370.689	567143.269	-27.970
6	179143.482	566823.033	-27.998
7	180391.904	568558.228	-27.866
8	180918.628	568507.199	-27.847
9	181284.597	567879.242	-27.868
10	185281.718	568952.859	-27.679
11	185764.619	570111.894	-27.583
12	186467.044	569397.450	-27.627
13	175465.786	565428.918	-28.076
14	180291.692	567158.273	-27.926
15	181673.636	569278.990	-27.784
16	182554.794	569517.792	-27.751
17	184477.024	568653.733	-27.723

또한 연구 대상지역의 수치지도(1:1,000)를 활용하여, 수치지도 상에서 현지 측량점의 위치를 포함하는 일정영

역에서의 등고선과 표고점 데이터를 추출한 뒤 불규칙삼각망을 구성하였다.

4. 정확도 평가

full waveform LiDAR 데이터를 이용한 정확도 비교 분석을 위해 수평위치보다는 수직위치의 정확도 평가에 중점을 두었으며, 산림 지역과 도심지역을 나누어 분석하였다. 정확하게 관측한 특정지점의 현지 측량 고도 값을 LiDAR의 관측 고도값 값과 수치지도의 등고선 고도 값을 통해 비교 분석하였다. 취득된 LiDAR의 관측 고도값 데이터를 통해 불규칙 삼각망(TIN)을 형성하고, 현지 측량점의 고도 값을 통해 고도차를 구하였다. 수치지도의 등고

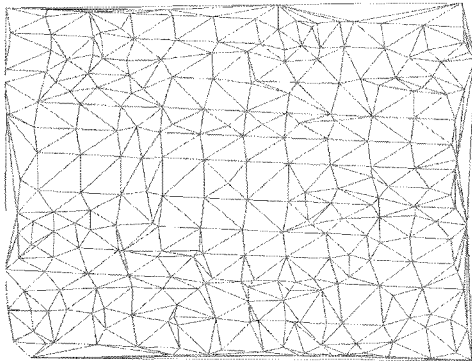


그림 4. LiDAR 데이터 및 수치지도 TIN 생성

선 역시 이와 같은 방법으로 고도차를 분석을 하였다. 보다 정확한 LiDAR의 관측 고도값 값을 취득하기 위해 macro를 통해 지형, 수목, 건물데이터를 자동 분류하였으며, 지형데이터에 대한 수동 필터링 작업을 수행하였다. 그림 4, 그림 5는 불규칙삼각망(TIN)을 통한 고도차 분석 과정을 나타낸 것이다.

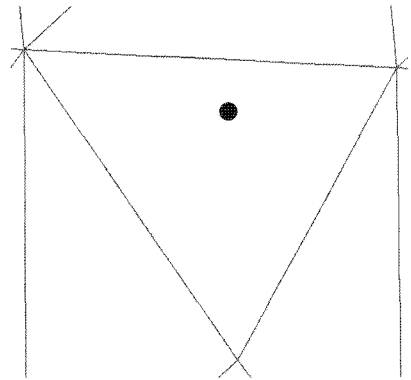


그림 5. GCP를 통한 정확도 분석

full waveform LiDAR 데이터를 이용하여 도심지역(천안시 일원) 10곳의 현지 측량점을 기준으로 고도값을 비교한 결과 표 5에서 보이듯이 LiDAR의 관측 고도값의 현지 측량점과의 오차에 대한 RMSE는 3.1cm로 나타났으며, 수치지도(1:1,000)와 현지 측량성과를 비교한 RMSE는

표 5. 위치 정확도 평가 - 도심지역 (단위:m)

No.	현지 측량점			LiDAR (Z)	수치지도 (D)	LiDAR (H-Z)	수치지도 (H-D)
	X	Y	정표고(H)				
1	209803.825	369530.211	46.783	46.788	46.944	-0.005	-0.161
2	210789.265	369424.279	52.729	52.745	52.693	-0.016	0.036
3	210047.475	368939.203	39.931	39.969	39.852	-0.038	0.079
4	210462.242	368921.395	50.642	50.660	50.729	-0.018	-0.087
5	211693.511	368954.980	61.151	61.144	61.197	0.007	-0.046
6	209693.289	368247.458	34.514	34.550	34.681	-0.036	-0.167
7	211552.604	368071.433	72.736	72.793	71.925	-0.057	0.811
8	209602.418	367636.551	33.023	33.066	32.607	-0.043	0.416
9	210616.688	367589.169	55.215	55.248	55.046	-0.033	0.170
10	211441.933	367659.243	58.654	58.642	57.939	0.013	0.715
성과비교				MAX		-0.057	0.811
				MIN		-0.005	0.036
				STDE		0.023	0.354
				RMSE		0.031	0.380

표 6. 위치 정확도 평가 - 산림지역 (단위:m)

No.	현지 측량점			LiDAR (Z)	수치지도 (D)	LiDAR (H-Z)	수치지도 (H-D)
	X	Y	정표고(H)				
1	175829.092	565698.752	839.875	839.921	839.899	-0.046	-0.024
2	177262.261	566263.624	903.290	903.232	903.533	0.058	-0.242
3	177567.853	566507.107	912.349	912.296	912.000	0.053	0.349
4	179197.284	567234.482	819.537	819.607	819.011	-0.070	0.526
5	179993.821	567458.183	571.468	571.506	571.862	-0.038	-0.393
6	180464.465	567601.552	515.781	515.778	515.710	0.002	0.071
7	182617.696	568578.331	151.866	151.832	152.138	0.035	-0.272
8	183780.501	569139.394	90.534	90.538	90.579	-0.004	-0.044
9	185476.341	569349.239	49.126	49.074	48.141	0.052	0.985
10	184977.418	569903.476	84.139	84.108	84.000	0.031	0.139
11	185749.272	569387.597	56.295	56.230	56.000	0.066	0.295
12	176230.918	565817.389	825.860	825.803	825.666	0.058	0.195
13	186158.908	569272.946	107.343	107.306	107.346	0.037	-0.003
성과비교				MAX		-0.070	0.985
				MIN		0.002	-0.003
				STDE		0.045	0.367
				RMSE		0.047	0.373

38.0cm로 나타났다. 수치지도의 경우 LiDAR보다 현격히 떨어지는 정확도를 확인할 수 있었다.

산림지역(대관령 일원) 13곳의 현지 측량점을 기준으로 고도값을 비교한 결과 표 6에서 보이듯이 LiDAR 관측 고도값과 현지 측량성과의 RMSE는 4.7cm로 나타났으며, 수치지도(1:1,000)와 현지 측량성과를 비교한 RMSE는 37.3cm로 나타났다.

기존 연구 발표된 discrete return LiDAR의 정확도 평가에서 31개의 현지 측량기준점과 LiDAR 데이터의 고도값을 비교한 결과 RMSE는 14cm로 나타났으며(위광재등 2006), 2009년 천안 지역의 켈리브레이션 데이터 보고서에서는 현지 측량점 9점을 사용하여 고도 정밀도를 분석하였고 오차의 RMSE는 6.0cm 나타났었다. 본 연구에서는 full waveform LiDAR 데이터를 이용하여 도심지역(천안시 일원) 10곳의 현지 측량점을 이용하여 고도값을 비교한 결과 현지 측량점과의 차이는 RMSE는 3.1cm로 나타났으며, 산림지역(대관령 일원) 13곳의 현지 측량점을 기준으로 고도값을 비교한 결과 RMSE는 4.7cm로 나타났다.

5. 결론

본 연구에서는 full waveform LiDAR의 위치정확도 분

석을 수행하기 위해 연구 대상지를 도심지역과 산림지역으로 나누어 선정하고, 항공레이저 측량 규정에 준하는 현지 측량점 선정하여 측량 하였다. LiDAR 데이터로 불규칙삼각망(TIN)을 형성하여 현지 측량점과 고도값을 비교 분석한 결과 다음과 같은 결론을 도출 할 수 있었다.

첫째, 현지 측량점을 기준으로 full waveform LiDAR의 관측 고도값의 정확도를 평가한 결과 도심지역(천안시 일원)에서 RMSE는 3.1cm로 나타났으며, 수치지도(1:1,000) 고도값의 정확도는 38cm로 나타났다. 또한 산림지역(대관령 일원)에서 현지 측량점과 LiDAR 관측 고도값의 오차 RMSE는 4.7cm로 나타났으며, 수치지도(1:1,000)와 현지 측량점을 비교한 RMSE는 37.3cm로 나타났다. 고도 관측값에 대해서 LiDAR가 수치지도(1:1,000)보다 정확도가 매우 높음을 확인할 수 있었다.

둘째, 기존 발표된 discrete return LiDAR의 정확도 분석 결과 RMSE는 6cm, 14cm로 본 연구의 결과 값과 비교해 볼 때 full waveform LiDAR의 정확도가 좀 더 높은 것으로 나타났다. 그러나 현지 측량점, 촬영시기, 점밀도 등의 조건이 동일하지 않은 실험이기 때문에 추후 동일한 조건으로 취득된 LiDAR 데이터로 정확도 분석이 수행되어야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

- 김성준, 이입평 (2010), 풀웨이브폼 라이다의 반사파형 시물레이션, 대한원격탐사학회지, 대한원격탐사학회, 제26권, 제1호, pp. 9-20
- 김용석, 김성철 (2008), LiDAR 데이터를 이용한 지형지물의 위치정확도 분석, 한국콘텐츠학회논문지, 한국콘텐츠학회, 제8권, 제3호, pp. 270-278
- 김은영, 위광재, 조홍목, 양인태 (2010), 항공레이저측량을 이용한 산림조사 방법에 관한 연구, 한국측량학회지, 한국측량학회, 제28권, 제3호, pp. 299-304
- 위광재, 양인태, 서용운, 심정민 (2006), 현지 측량기준점을 이용한 LiDAR 데이터의 정확도 검증, 한국지형공간정보학회지, 한국지형공간정보학회, 제14권, 제4호, pp. 11-18
- 유환희, 정동기, 구신희, 어재훈 (2005), 필터링 기법을 이용한 LiDAR 자료로부터 DTM 추출, 한국 GIS 학회 논문집, 한국 GIS 학회, pp. 355-361
- 윤희천, 이창복, 박정현, 윤경철 (2006), GPS를 이용한 항공 LiDAR 측량 DEM의 정확도 검증, 대한토목학회 정기학술대회 논문집, 대한토목학회, pp. 4487-4490
- 이동천, 이선근, 염재홍, 임세봄, 김계림 (2007), 수치지도 등고선의 Model key Point 추출과 Progressive Sampling에 의한 수치지형모델 생성, 한국측량학회지, 한국측량학회, 제25권, 제6-2호, pp. 645-651
- 이동하, 김영섭, 서용철 (2009), 고해상도 항공라이다 DEM 해석을 통한 강원도 일원의 산사태 예측 가능성 분석, 한국 GIS 학회지, 한국 GIS 학회, 제17권, 제3호, pp. 381-387
- 이병길, 이상훈, 김진광, 김창재 (2009), 산림지역에서 LiDAR 측량의 정확도 평가, 한국측량학회지, 한국측량학회, 제27권, 제5호, pp. 545-553
- 정명희, 윤의중, 김천식 (2007), 라이다 파장 분석 방법론에 대한 연구, 전자공학회 논문지, 전자공학회, 제44권, CI편, 제4호, pp. 339-346
- Aulinger, T (2005), Validation of heights from interferometric SAR and LIDAR over the temperate forest site, Nationalpark Bayerischer Wald. *POLINSAR Workshop*
- Baltsavias M (2006), Tree height measurements and tree growth estimation in a mire environment using digital surface models, *International Workshop "3D Remote Sensing in Forestry"*
- Christopher E (2007), Investigating Full Waveform LiDAR Data for Detection and Recognition of Vertical Objects, *ASPRS 2007 Annual Conference*
- Heurich, M (2004), Automated Tree Detection and Measurement in Temperate Forests of Central Europe Using Laserscanning Data, *Proceedings of the ISPRS working group VIII/2 Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment, Volume XXXVI*
- Hofton, M (2000), Decomposition of Laser Altimeter Waveforms, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38: pp. 1989-1996.
- Holmgren, J (2003), Estimation of Forest Variables using Airborne Laser Scanning. *Doctoral thesis*, Swedish University of Agricultural Sciences, Umea.

(접수일 2011. 04. 28, 심사일 2011. 05. 22, 심사완료일 2011. 06. 24)