Korean Journal of Remote Sensing, Vol.26, No.1, 2010, pp.9~20

풀웨이브폼 라이다의 반사파형 시뮬레이션

김성준 · 이임평†
서울시립대학교 공간정보공학과

Waveform Simulation of Full-Waveform LIDAR

Seongjoon Kim and Impyeong Lee†
Department of Geoinformatics, The University of Seoul

Abstract : The LIDAR data can be efficiently utilized for automatic reconstruction of 3D models of objects on the terrain and the terrain itself. In this paper, we attempted to generate simulated waveforms of FW (Full-Waveform) LIDAR (LIght Detection And Ranging). We performed the geometric modeling of the sensor and objects, and the radiometric modeling of the waveform intensity. First, we compute the origins and directions of the sub-beams by considering the divergence effects of a laser beam. We then searched for the locations at which the sub-beams intersected with the objects, such as ground, buildings and trees. Finally, we generate the individual waveforms of the reflected sub-beams and the waveform of the entire beam by summing the individual ones. With the experimental results, we confirmed the waveforms were reasonably generated, showing the characteristics of the surfaces the beam interacted with.

Key Words : LIDAR, Simulation, Sensor Modeling, Geometric Modeling, Radiometric Modeling, Sub-Beam, Tree Model.

요약 : 지형지물의 표면정보를 신속하게 취득할 수 있는 LIDAR 시스템은 대상에 대한 정교한 3차원 자동 모델링에 효율적이다. 본 연구의 목표는 대상물의 표면에 부딪혀 되돌아오는 레이저빔의 반사파형(waveform)을 모의 생성하는 것이다. 이를 위해, LIDAR시스템을 구성하는 센서들과 객체의 기하모델링 및 복사 모델링을 수행하였다. 먼저, 다반사 특성의 원인이 되는 레이저빔의 확산(divergence) 효과를 고려하기 위해 레이저빔을 여러 개의 서브빔으로 분할한 후, 각 서브빔의 원점과 방향을 결정한다. 그리고 서브빔이 교차하는 객체의 표면을 탐색한 후, 교차점의 위치를 계산한다. 마지막으로 서브빔의 원점과 소요시간을 기반으로 반사파형을 생성하고 이를 조합하여 전체 레이저빔의 반사파형을 생성한다. 제안한 방법을 적용한 실험을 수행하였으며, 그 결과 빔이 교차하는 표면의 특성을 보여주는 반사파형이 합리적으로 생성됨을 확인할 수 있었다.

접수일(2009년 12월 2일), 수정일(1차 : 2010년 2월 20일, 2차 : 2월 22일), 게재확정일(2010년 2월 25일).
† 교신저자: 이임평(iplee@uos.ac.kr)

1. 서 론

LIDAR 시스템은 대상물의 표면에서 조밀하게 취득된 3차원 좌표를 제공하기 때문에 대상물의 정밀한 3차원 모델링에 효율적으로 이용될 수 있다. 라이다데이터는 기존의 항공사진이나 현지측량을 대체하여 도시모델 생성, 변화 탐지(Change Detection), 삼림지역 DTM (Digital Terrain Model) 생성, 해안선측량 등에 이용되고 있다.

라이다 시스템에 탑재되어 있는 Laser Ranging 모듈은 하나의 레이저빔이 발사되어 대상물에서 반사되어 되돌아오는 시간을 이용하여 거리를 계산하는 TOF(Time of Flight)방식에 기반한다. 도로나 건물 등과 같이 표면이 비교적 매끄러운 지역에서 반사하는 빔은 시간에 따른 에너지의 분포 곡선이 가우시언(Gaussian) 형태에 가깝지만, 건물의 모서리나 계곡과 같이 절단선(breakline)이 존재하는 지역이나 산림지역과 같이 표면이 거친 지역에서는 각기 다른 곳에서 되돌아오는 여러 개의 반사파가 조합되어 매우 복잡한 형태를 보이는 반사파형이 생성된다. 현재 국내외에서 사용하는 대부분의 라이다시스템은 이러한 다반사(multiple return) 펄스를 각각 탐지하고 보통 세 번째 반사파까지의 반사위치 정보를 제공한다. 이러한 시스템을 Discrete LIDAR 시스템이라고 한다(Chauve *et al.*, 2007).

반면 FW(Full-Waveform) LIDAR는 레이저빔이 반사하여 되돌아오는 반사 펄스들이 합쳐져서 생성된 반사파형(full-waveform)을 기록하는 시스템이다. 이러한 FW 라이다는 1990년대에 해양이나 수목 분야에서 많이 사용되었으며(Persson *et al.*, 2005), 최초의 상업용 시스템은 LMS-Q560이다(Mallet *et al.*, 2009). FW 라이다는 사용자가 점데이터가 아닌 각각의 레이저빔에 대한 반사파형(waveform) 데이터를 직접 후처리(post processing)할 수 있기 때문에 보다 양질의 정보를 추출할 수 있다는 장점이 있다. 예를 들어, 대상에 따라 각기 다른 펄스검출(pulse detection) 알고리즘을 적용할 수 있으며(Wagner *et al.*, 2007), 되돌아온 반사파의 펄스폭이나 에너지와 같은 특성을 고려한 분류(classification)를 수행할 수 있다. 또한 초목(vegetation)지역의 반사파(echo pulse)를 제거함으로써 순수한 지면점(ground points)을 추출하여 고품질의 DTM(Digital Terrain Model)을 생성할 수 있다(Reitberger *et al.*, 2008). Fig. 1은 RIEGL사의 LMS-Q560의 반사파형 데이터의 기록방법을 설명하고 있다.

국외에서는 이러한 반사파형 데이터를 이용하는 연구를 활발히 수행하고 있다. Persson *et al.* (2005)은 반사파형 라이다시스템으로부터 취득된 반사파형 정보를 3차원으로 가시화하여, 반사파의 위치정보를 정성적으로 분석하였으며, Wagner *et al.* (2004, 2006)는 small-footprint FW 라이다 시스템의 반사파형 데이터에 Gaussian decomposition을 적용하여 개별 반사파를 추정하였고, 다양한 펄스검출(pulse detection) 알고리즘을 시험하여 각각의 성능을 분석하였다. 또한 이 기종으로 다른 지역을 촬영한 데이터의 반사강도를 비교하기 위하여 반사강도의 보정(calibration)을 시도하였다. Chauve *et al.* (2007)는 반사파형으로부터 반사파를 추정할 때, 국부적인 지역의 특성에 따라 Gaussian decomposition이 적용되지 않는다는 사실을 발견하고, Log-normal과 Generalized gaussian 함수를 이용하여 반사파를 보다 잘 추정하고자 하였다.

Reitberger *et al.* (2008)는 대상물의 특성을 고려한 펄스검출(pulse detection) 알고리즘을 폴웨이브폼 데이터에 적용하면 보다 많은 반사파(echo pulse)정보를 취득할 수 있으며, 특히 침엽수보다 활엽수에서 중간 리턴펄스의 개수가 많이 나타난다는 사실을 이용하여 수목 분류(classification)를 수행하였다.

이러한 연구들은 반사파형을 직접 처리(processing)하고 반사파의 특성을 분석하여, 기존의 discrete 라이다 시스템의 데이터보다 많은 정보를 추출하기 위함이

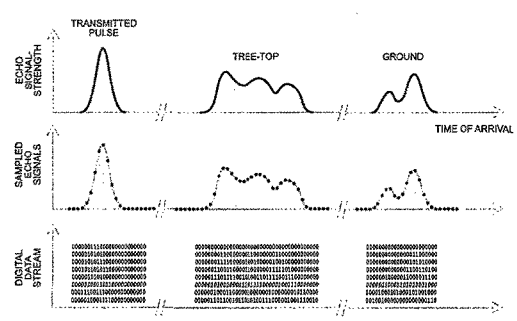

Fig. 1. Waveform digitizing of LMS-Q560 (Wagner *et al.*, 2006).

다. 국내에서도 반사파형 라이다 센서를 이용하여 수목 생체량 측정이나 수목에 가려져 있는 물체를 탐지하기 위한 연구가 진행되고 있지만 현재는 초기단계에 머물러 있는 실정이다.

LIDAR 시뮬레이션에 대한 연구는 다음과 같다. NASA에서는 ICESat에 탑재되어 있는 GLAS (Geoscience Laser Altimeter System)의 하드웨어를 디자인하고 성능검증을 위해 시뮬레이션을 수행하였고 (Filin and Csatho, 2000), University of Utah에 있는 CAIL(Center for Advanced Imaging LADAR)에서는 LADAR 데이터 시뮬레이션 소프트웨어를 개발하고 활용 중에 있다(Pack *et al.*, 2006). 이러한 연구들은 대부분 반사파형을 시뮬레이션하는 것에 초점을 맞추어서 기하학적인 모델링이 취약하거나(Ene *et al.*, 2007; Telgarsky *et al.*, 2004), 시뮬레이션에 사용되는 입력 데이터가 3차원이 아닌 2차원의 반사도 영상을 주로 이용하였다.

본 연구에서는 FW(Full-Waveform)라이다 시스템의 센서 모델링을 통하여 레이저빔의 반사파형을 모의 생성하고자 한다. 이를 위해, 먼저 가상의 지형과 객체 위에 주어진 비행경로에 따라 생성된 레이저 센서로부터 송신되는 레이저 펄스가 교차하는 위치를 계산하고, 다반사 특성을 고려하기 위해 확산각(divergence angle)에 기반한 서브빔을 생성한다. 마지막으로 각 서브빔이 객체에 맞고 되돌아오는 다양한 반사파를 조합하여 반사파형을 생성한다.

2. 반사파형 시뮬레이션 방법

Fig. 2는 TOF(Time of Flight)방식의 라이다 시스템의 원리와 시뮬레이션을 수행하기 위한 요소들을 보여주고 있다. 레이저 스캐너에서 발사된 빔은 건물, 수목 등의 객체와 부딪히고 반사되어 되돌아오는 반사파의 시간을 이용하여 센서로부터 교차점까지의 거리를 측정한다. 레이저빔은 대기를 투과할 때 대기감쇠 현상이 일어나며, 수목지역과 같이 표면이 거친 영역에서 반사되는 경우에는 다양한 시각에서 되돌아오는 반사파들이 발생한다. 그리고 센서 감지기(detector)에 기록되는 반사파형은 다양한 시각에 되돌아온 가우시언 형태의

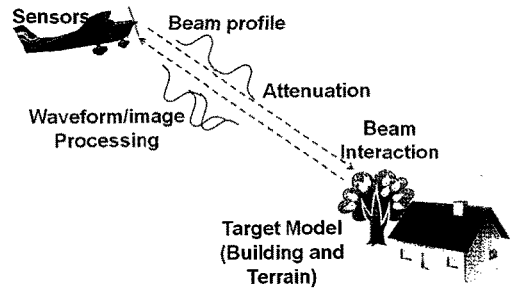

Fig. 2. Principle of a Pulsed LIDAR system (Kim *et al.*, 2009).

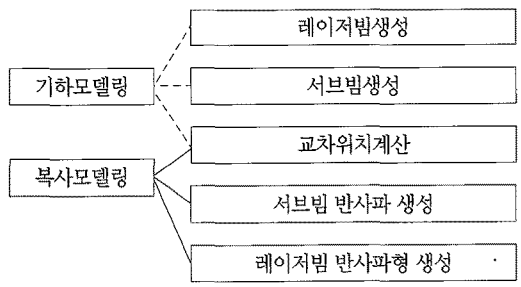

Fig. 3. Process for the generation of waveform.

에너지 분포 곡선의 합으로 표현된다. 이러한 라이다 시스템의 모의 데이터를 생성하기 위해서는, Fig. 3에서와 같이 라이다 시스템을 구성하는 GPS, INS, LS (Laser scanner)와 같은 서브 센서 모듈과 객체사이의 기하학적 모델링이 선행되어야 하며, 발사된 레이저빔이 대기를 투과하거나 대상객체와의 상호작용으로 일어나는 에너지의 변화를 모델링해야 한다. Fig. 3은 시뮬레이션을 통한 반사파형 생성과정을 보여주고 있다.

1) 기하모델링

기하 모델링이란 라이다시스템을 구성하는 서브모듈 즉 GPS, INS, LS의 1) 좌표계간의 기하학적인 관계와, 2) 레이저빔과 빔이 반사하는 위치와의 기하학적인 관

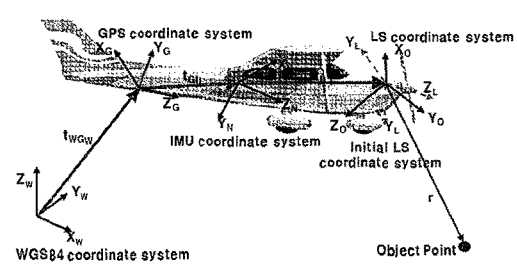

Fig. 4. Geometric relationship between sensors of airborne LIDAR system (김성준 외, 2008).

계를 수립하는 것을 말한다. 이러한 기하모델링을 위해서는 Fig. 4와 같은 각각의 센서 좌표계와 이격(offset)을 지닌 개별센서의 정보를 조합하여 펄스가 반사한 지점의 3차원 좌표를 계산하기 위한 센서 방정식을 수립해야 한다(김성준 외, 2008).

이를 위해서 먼저 시스템 오차가 포함되어 있지 않은 센서 방정식을 수립한 후, 오차요소를 포함시키면 식 (1)과 같은 최종적인 센서 방정식을 구할 수 있다.

$$P_W^* = R_{GW}\Delta R_{IG}R_{IG}(\Delta R_{LI}R_{LI}\Delta R_{0L}R_{0L}u_z(r+\Delta r) + t_{GL_I} + \Delta t_{GL_I}) + t_{WG_W} + \Delta t_{WG_W} \quad (1)$$

식에서 사용된 첨자(0, L, N, G, W)는 각각 LS초기좌표계, LS좌표계, INS좌표계, GPS좌표계, WGS84좌표계를 의미하며, t는 좌표계간의 이격벡터, R은 좌표계 변환을 위한 회전행렬이다. r은 레이저스캐너로부터 펄스가 반사한 지점까지의 거리를 나타내며, Δ는 시스템 오차를 나타낸다.

2) 복사모델링

에너지 모델링이란 레이저 스캐너로부터 발사된 레이저 빔이 대기를 투과하고 대상객체의 표면에서 반사되어 돌아오는 동안의 복사에너지의 변화를 모델링하는 것을 말한다. 레이저빔의 에너지는 빔의 횡단면(cross section)상의 위치와 시간에 따라 변화하기 때문에 식 (2)와 같이 공간도메인과 시간도메인에 따라 각각 에너지 모델링을 수행하여야 한다. $I(x,y)$는 빔의 단면적 상에서 위치에 따른 에너지를, $p(t)$는 시간에 따라 변화하는 에너지를 의미한다. 그리고 I_0는 레이저빔의 전체 에너지를 의미한다(Steinvall and Carlsson, 2001).

$$\begin{aligned} U(x,y,z) &= V(z)\times I(x,y) \\ &= V(ct)\times I(x,y) \\ &= I_0\times p(t)\times I(x,y) \end{aligned} \quad (2)$$

(1) 공간도메인의 에너지 모델링

레이저빔의 에너지는 횡단면(cross section)상에서 항상 일정하게 분포하지 않는다. Fig. 5와 같이 빔의 중심으로부터 멀어질수록 에너지는 약해지며, 중심으로부터의 거리에 따른 에너지 분포를 살펴보면 가우시언 분포와 유사한 형태를 나타낸다. 빔의 횡단면상에서의 에너지 분포를 표현하는 모델은 크게 Gaussian model과 Source diode model이 있으며, 식 (3)은 가우시언 모델을 수식으로 표현한 것이다. 이때, r은 중심축으로부터의 거리, ω는 빔의 Half-width를 의미한다(Eugene, 2007).

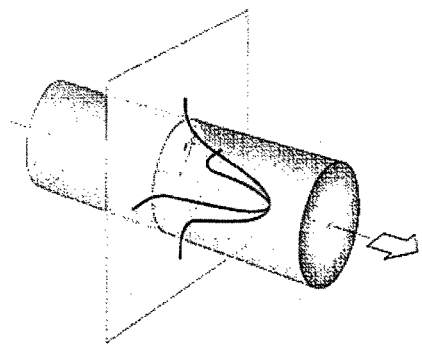

Fig. 5. Energy distribution of laser beam in cross-section (Blanquer, 2007).

$$I(r) = I_0\exp\frac{-2r^2}{\omega^2} \quad (3)$$

(2) 시간도메인상의 에너지 모델링 방법

라이다 시스템은 일반적으로 식 (4), 식 (5)와 같은 두 가지의 펄스모델을 사용한다. 기본적인 펄스의 모양은 Fig. 6에서와 같이 가우시언의 형상을 따르고 있지만 식(4)의 모델이 가우시언 형상에서 peak가 좌측으로 치우쳐져 있다는 점이 다르다. 보통 라이다 시스템의 펄스검출기는 Leading edge방법을 사용하기 때문에 식(4)의 펄스모델을 사용하면 펄스검출의 정확도가 높아진다는 장점이 있다. $T_{1/2}$는 펄스의 반치폭(FWHM, Full

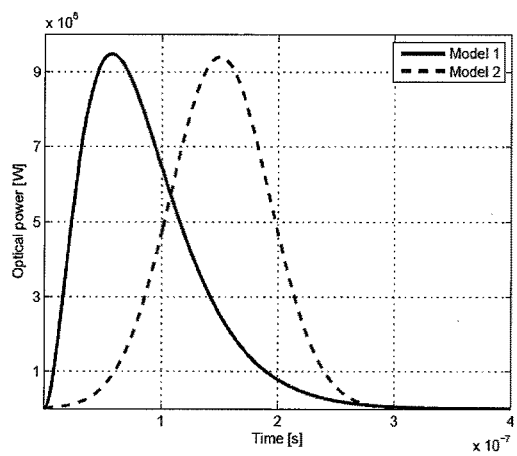

Fig. 6. Shape of laser purse.(Model 1: Eq(4), Model 2: Eq(5)) (Blanquer, 2007).

Width Half Maximum)을 의미한다. 반치폭이 낮아지면 펄스의 형태가 좁아지면서 보다 뾰족한 모양이 되며, 높아지면 반대로 보다 평평한 형태를 이루게 된다. 전자는 펄스검출(pulse detection) 프로세싱에서 노이즈로 오인되어 버리고, 후자는 최고점의 에너지가 높지 못하여서 펄스검출(pulse detection)이 실패할 가능성이 높아진다(Blanquer, 2007).

$$p(t) = \left(\frac{t}{\tau}\right)^2 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right), \tau = \frac{T_{1/2}}{3.5} \quad (4)$$

$$p(t) = \exp\left[-4\log(2) \times \left(\frac{t - 3/2 \times T_{1/2}}{T_{1/2}}\right)^2\right] \quad (5)$$

3) 시뮬레이션 방법

본 연구에서는 시뮬레이션을 통해 레이저 스캐너 센서에서 발사된 레이저빔의 반사파를 모의 생성하여 대상객체의 표면에서 반사되어 돌아오는 반사파형을 생성하고자 한다. 특히 주로 수목지역에서 나타나는 다반사 특성(multiple return)을 모델링하기 위해서는 Fig. 3과 같이 레이저빔이 만나는 타겟의 표면을 탐색하고 교차점을 계산하는 기하모델링과, 빔이 표면에서 반사되어 되돌아가는 동안 일어나는 에너지의 변화를 추정하는 에너지 모델링이 있다.

반사파형을 모의 생성하기 위하여 레이저빔을 서브빔으로 분할한 후, 각 서브 빔의 기하학적인 모델링을 통해 펄스가 되돌아오는 시간을 이용한다. 구체적인 방법은 다음의 순서로 설명할 수 있다. 반사파형의 생성하는 구체적인 방법론은 Fig. 3에서와 같이 크게 4단계 프로세스로 구성된다.

(1) 탑재체의 위치(location)와 레이저빔의 발사방향(direction)을 이용하여 빔이 지나가는 경로의 직선(ray)을 결정한다.

(2) 빔의 확산각(divergence)를 고려하여 하나의 빔을 구성하는 여러 개의 서브 빔을 생성하고, 각 서브 빔에 대해서도 기하학적인 직선을 모델링한다.

지형지물의 3차원 모델을 이용하여 DEM 데이터를 생성한 후, 서브빔과 교차하는 격자를 탐색하여 후보 평면들과의 교차여부를 검사하고 교차점을 계산한다. 만약 교차 후보 객체중 수목이 있다면 점데이터는 수목의 내부에서만 생성이 되어야 하므로, 각 서브 빔과 타원체가 교차하는 범위를 계산하여 모의점이 생성될 수 있는 범위를 설정한 후 확률에 기반하여 범위 내의 교차직선상에 임의의 라이다 점을 생성한다(김성준, 이임평, 2009).

(3) 반사파는 시간에 따르는 서브빔의 에너지 분포곡선이므로, 센서의 위치에서 모의점까지의 거리를 이용하여 레이저 펄스가 이동한 시간을 계산하고, 펄스모델 함수를 펄스의 이동시간 만큼 평행이동(parallel transference)해줌으로써 반사펄스(returned-pulse)를 모델링한다.

(4) 하나의 레이저빔에 속하는 서브 빔의 반사펄스를 조합(summation)하여 반사파형(waveform)을 생성한다.

(1) 레이저빔 생성

레이저빔 생성은 특정시각 t에서 발사되는 레이저 펄스의 방향(direction)과 원점(origin)을 결정하기 위함이다. 레이저 펄스가 지나가는 경로는 식 (6)과 같이 방향벡터와 원점위치를 이용하여 직선방정식으로 표현할 수 있다.

레이저 펄스의 반사지점에 대한 3차원 좌표 (P_W)를 계산하기 위해서 식에 포함된 P_L, u_L, 및 r을 알아야 한다. P_L과 u_L은 라이다를 탑재한 항공기의 경로 및 자세에 대한 정보를 이용하여 결정할 수 있으며, 결정된 P_L을 시점으로 u_L의 방향을 갖는 레이저 펄스의 진행 경로(travel path)를 모델링 할 수 있다.

특정 시각 t에서 발사되는 레이저 펄스의 방향 u_L은 식 (7)에서 표현된 것처럼 R_{IW}, R_{LI}, R_{0L}, u_z의 조합으로 결정되며, 송신원점 P_L은 식 (8)과 같이 시점(P_s), 종점(P_e), 속도(V)를 이용하여 비행기의 위치를 계산하고, 비행기의 위치 t_{WG_W}에 GPS좌표계의 원점과 LS좌표계의 원점사이의 이격벡터를 나타내는 $R_{IW}t_{GL_I}$을 더하면 레이저 펄스의 송신원점 P_L을 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$P_W = u_L r + P_L \quad (6)$$

$$u_L \equiv R_{IW} R_{LI} R_{0L} u_z \quad (7)$$

$$t_{WG_W} = P_s + V(t - t_s) = P_s + \frac{P_e - P_s}{\|P_e - P_s\|} v(t - t_s) \quad (8)$$

$$P_L \equiv R_{IW} t_{GL_I} + t_{WG_W} \quad (9)$$

(2) 서브빔 생성

레이저 스캐너로부터 발사된 하나의 빔은 진행방향을 중심으로 일정한 확산각으로 퍼지는 특성을 가지고 있다. 항공 라이다 시스템의 경우 보통 1 km상공에서 0.3~0.8 m 크기의 풋프린트(footprint)가 나타난다 (Wagner *et al.*, 2006). 라이다의 이러한 특성으로 인하여 도심지의 건물이나 도로, 운동장과 같이 평평한 지역에서는 센서의 검출기에서 반사파들이 거의 동시에 감지되지만, 수목이나 건물의 모서리와 같은 곳에서는 반사파 에너지가 다양한 시간간격으로 감지가 된다. 본 연구에서는 시간에 따른 반사파를 합리적으로 모델링하기 위하여, 레이저빔의 원점과 방향, 확산각을 이용하여 Fig. 7같이 여러 개의 서브빔의 원점과 방향벡터를 계산하고, 이를 시뮬레이션에 적용한다. Fig. 7과 같이 m x n개의 서브빔을 생성할 때 각 서브빔의 방향 벡터는 식 (10), 식(11), 식 (12)로 표현된다. 식 (10)에서 서브빔의 방향을 나타내는 단위벡터($u_s(i, j)$)와 이동거리(r), 시점(P_L)을 이용하여 서브빔이 반사한 지점의 위치를 계산하는 식이다. 여기서 $u_s(i, j)$는 식 (11)과 식 (12)에서와 같이 레이저빔의 방향벡터 (u_{beam})와 m x n개의 분할한 서브빔의 정의를 조합하여 계산할 수 있다. 식(11)의 $R(\omega)$는 라이다 시스템의 Zig-Zag 스캐닝 타입 방식에 기인한 시간에 따른 스캔각(τ)을 고려한 것이다.

$$P_W(i,j) = u_s(i,j)r + P_L \tag{10}$$

$$u_{beam} = R_{IW}R_{LI}R_{0L}R(\omega), R(\omega) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\tau & -\sin\tau \\ 0 & \sin\tau & \cos\tau \end{bmatrix} \tag{11}$$

$$u_{s(i,j)} = u_{beam}\begin{bmatrix} \sin(\theta_{FWHM}(i-m/2)) \\ \sin(\theta_{FWHM}(j-n/2)) \\ -\cos(\theta_{FWHM}\ (i-m/2)^2 + (j-n/2)^2 \end{bmatrix} \tag{12}$$

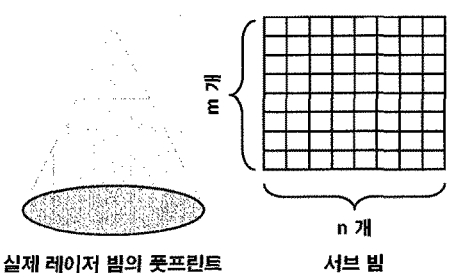

Fig. 7. Divergence of laser beam and geometric modeling of subbeams (김성준, 이임평, 2009).

(3) 교차점 계산

레이저 펄스의 원점 및 방향으로 정의된 직선과 시뮬레이션의 입력데이터로 "Ray-Tracing" 알고리즘을 사용하여 레이저 펄스와 교차하는 지형지물 객체를 탐색하고 교차지점의 위치를 결정한다.

Fig. 8은 "Ray-Tracing" 알고리즘을 이용하여 레이저 펄스와 각각 상응하는 객체들의 최대/최소 높이 값을 가지고 있는 격자로 이루어진 DEM이 교차하는 지점을 찾아내는 원리를 도식화한 것이다. 먼저 Fig. 9에서와 같이 지형지물의 전체영역의 범위와 적절한 간격을 갖는 DEM을 생성한 후, 각 셀의 위치에 해당하는 객체들의 최대/최소 높이 정보를 저장한다. 그리고 DEM의 최대 및 최소 고도값을 포함하는 수평면들과 펄스 직선과의 교차점에 대한 수직방향의 범위 및 수평방향의 범위를 반복적으로 재설정하여 축소시킨다. 축소되는 변화량이 일정 임계치 이하로 낮아지면, 탐색을 중단하고 선택된 셀에 연결되어 있는 후보 평면들을 추출하여 펄스 직선과의 교차유무를 검사한다.

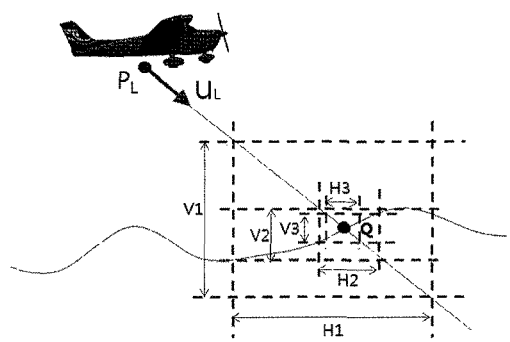

Fig. 8. Principle of Ray-tracing algorithm(김성준 외, 2008).

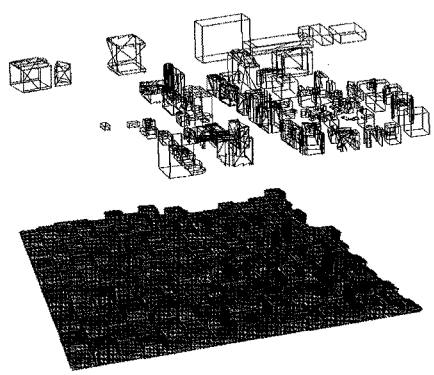

Fig. 9. Grid structure of background model.

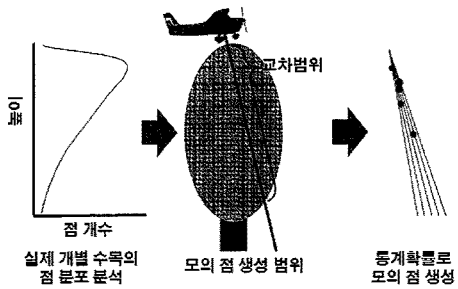

Fig. 10. Method to generate the simulated point of the crown (김성준, 이임평, 2009).

만약 서브빔의 교차하는 객체가 수목이라면 Fig. 10과 같이 서브빔이 반사할 수 있는 교차범위를 계산한 후, 실제 수목영역의 라이다 점데이터 분포와 유사한 통계확률을 적용하여 임의의 점을 생성한다. 실제 수목영역의 라이다 점데이터를 살펴보면 상단의 표면부위에 많이 분포하고, 내부로 들어갈수록 점밀도가 낮아진다는 점에 착안하여 이와 유사한 형태의 감마분포(Gamma distribution)를 사용하였다.

(4) 에너지 계산

일정한 파워를 가지고 발사된 레이저빔은 횡단면(cross section)상에서 항상 일정하게 분포하지 않으므로 횡단면(cross section)상에서의 에너지 분포를 계산하여 각각의 서브빔이 갖는 에너지를 결정한다. 빔 에너지는 가우시언 형태의 에너지 분포를 나타내고 있으므로 식(3)을 이용하여 각 서브빔이 갖는 에너지를 각각 계산하면 Fig. 11과 같이 레이저빔에 해당하는 서브빔의 에너지 모델을 얻을 수 있다.

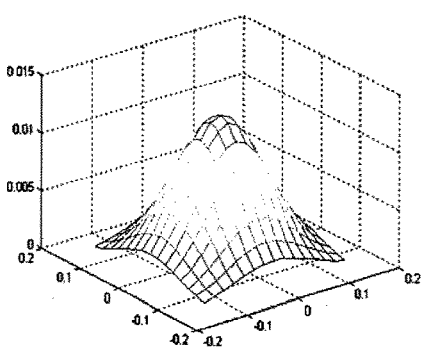

Fig. 11. Energy distribution of beam in cross-section.

(5) 반사파(echo) 및 반사파형(waveform) 생성

반사파형은 레이저스캐너 센서의 디텍터가 빛의 속도로 센서의 송신부(transmeter)와 객체의 표면을 왕복 이동한 펄스(pulse)를 감지하는 시간 도메인상의 에너지 변화를 의미한다. 센서의 감지기에서 감지되는 시간에 따른 반사파의 에너지량은 식 (13)과 같이 나타낼 수 있다. t_0는 서브빔이 표면에 도달한 시간이며, $T_{1/2}$는 펄스의 반치폭을 나타낸다. 앞에서 언급한 식 (4)의 펄스 모델식에서 반사파가 대기 중을 이동한 시간만큼 평행이동(shift)시켜 식(13)을 수립할 수 있다. 마지막으로 생성된 서브빔의 반사파형들을 조합하여 반사파형을 생성한다. Fig. 12와 같이 각각 다른 시각에 되돌아온 서브빔 펄스들의 합하면, 복잡한 형태의 반사파형이 생성된다.

$$p(t) = ((t - t_0)/\tau)\exp\left(-\frac{t - t_0}{\tau}\right) \qquad (13)$$

$$\tau = T_{1/2}/3.5, T_{1/2} = FWHM, t_0 = flight\ time$$

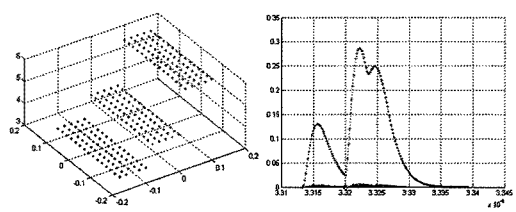

Fig. 12. Waveform (right) of beam reflected on the surface of different heights (left)(김성준, 이임평, 2009).

3. 실험 및 검토

FW라이다 시스템에서 생성되는 반사파형 데이터를 모의 생성해보고, 이를 정성적으로 확인하기 위한 실험을 수행하였다. 먼저 간단한 지형과 건물, 수목 모델을 생성하고, 주어진 비행경로에 따라 라이다시스템이 취득하는 서브빔의 반사파형을 모델링하고 이로부터 전체 반사파형을 생성한다.

1) 객체 모델링

Fig. 13은 본 연구의 실험을 위하여 제작한 가상의 객체모델이다. 지표면은 DEM구조를 가지고 있으며 50 × 50의 격자간격은 1 m 이다. 건물은 B-rep형태의 다면체모델이며 각 면을 구성하는 모서리점의 좌표값을

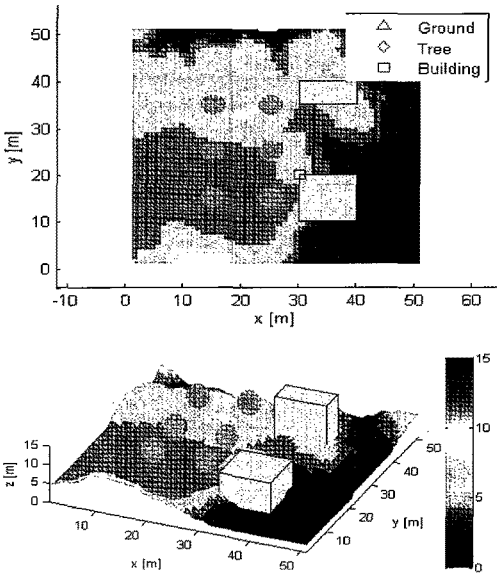

Fig. 13. 2D(top) and 3D(bottom) visualization of background and target models (Terrain: DEM, Building: B-rep, Tree: Ellipsoid).

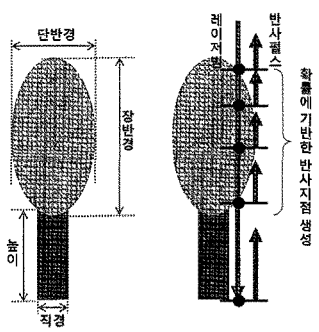

Fig. 14. Parameters of tree model (left) and simulation method (right) (김성준, 이임평, 2009).

지니고 있다. 수목모델은 Fig. 14와 같이 타원체로써 일반화하였다. 수목은 나이와 수종에 따라 다양한 크기와 형태를 지니고 있으며, 내부에는 복잡한 가지와 나뭇잎을 가지고 있다. 자연물은 그 형태가 매우 불규칙적이기 때문에 자연물의 데이터 모델링은 단순하게 이루어 질 수 없다. 수목을 모델링하고자 기존의 연구들을 살펴보면 확률통계적인 성질이나 재귀적인 성질을 이용하거나, 광학영상 데이터를 이용하여 정교한 3차원 모델링을 시도한 것이다(장수영, 1993; 최윤석 외, 1996; Ping Tan *et al.*, 2007). 그러나 이러한 수목 모델은 기하학적으로 복잡하여 시뮬레이션 연산량이 높아져서 시뮬레

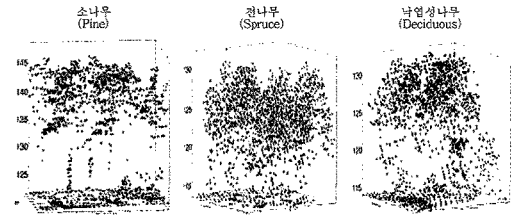

Fig. 15. Real LIDAR data from tree (Persson *et al.*, 2005).

이션에는 부적합하다. 게다가 Fig. 15와 같이 실제 수목의 라이다데이터를 살펴보면 거의 랜덤하게 점이 생성되기 때문에 수목모델을 단순하게 정의하고 실제 수목의 라이다데이터의 점 분포와 유사한 통계적인 모델을 고려하여 모의 데이터를 생성하는 것이 합리적인 접근 방법이다.

2) 시스템 변수 설정

시뮬레이션에 관련한 시스템 변수는 크게 비행 플랫폼, 라이다시스템, 객체의 반사정보 등으로 구분할 수 있다. 플랫폼 변수는 비행기가 이동하는 경로에 대한 정보로써 출발점과 종점, 비행고도, 비행속력이 있다. 라이다시스템은 초당 펄스 송신 회수(pulse rate, r_{pulse}), 초당 스캔 회수(scan rate, r_{scan}), 스캔앵글(scan angle, θ_{scan}) 등이 있으며, 이러한 변수들을 조합하여 생성되는 점데이터의 횡/종 간격을 정할 수 있다. 본 연구에서는 제안한 반사파형(waveform) 모델링 방법을 확인하는데 초점을 맞추었으므로 실제 라이다시스템 변수와는 약간 다른 값으로 설정하였다. 먼저 플랫폼은 (5, 25) m에서 출발하여 (45, 25)위치까지 움직이며 이때의 비행고도는 500 m, 속도는 50 m/s로 설정하였다. 라이다 센서의 시스템 변수에 관해서는 초당송신회수와 스캔회수를 각각 10,000 Hz, 100 Hz으로 스캔앵글을 ±2°, 확산각(beam divergence)는 3 mrad로 설정하였다. 마지막으로 레이저빔의 수목투과율은 겨울철이 아닌 경우의 혼합림의 실제 레이저빔의 투과율인 20%로 결정하였다(Ackermann, 1999).

3) 시뮬레이션 결과

Fig. 16, Fig. 17, Fig. 18은 각 대상 객체별 서브빔과 레이저빔의 반사파형을 보여주고 있다. 건물에 관련한 Fig. 16을 살펴보면 지붕면에서 반사한 레이저펄스는

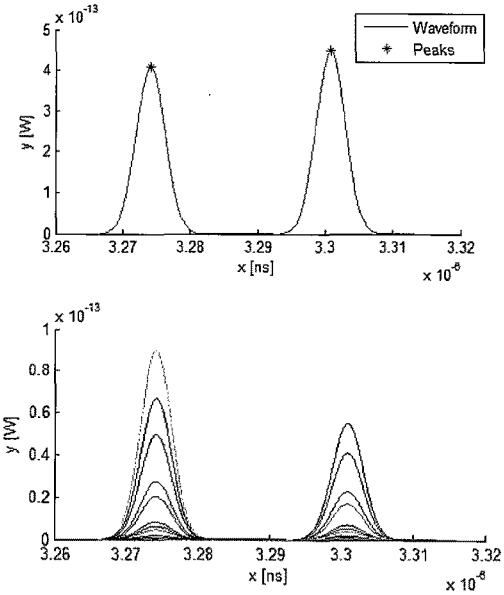

Fig. 16. Waveforms of the laser beam (top) and sub-beams (bottom) on the corner of a building.

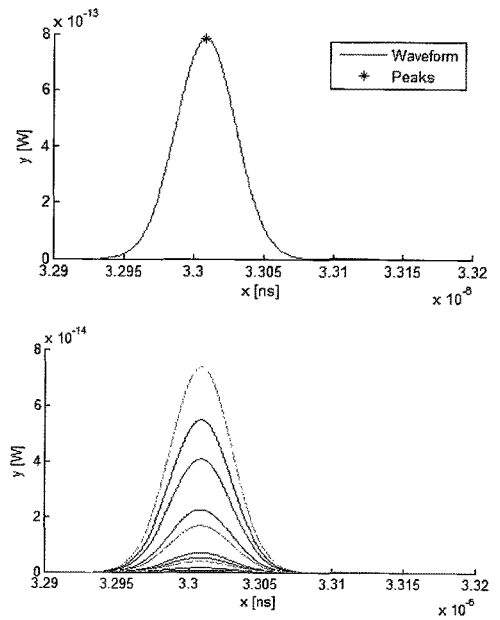

Fig. 17. Waveforms of the laser beam (top) and sub-beams (bottom) from a smooth ground.

지표면의 경우와 거의 동일하지만 모서리 부분에서 반사한 레이저빔의 반사파형은 보다 복잡한 모습을 보여줌을 알 수 있다. 지표면에서 반사한 반사파형을 나타낸 Fig. 17은 대부분의 서브빔이 거의 동시에 지표면에 도달하고 반사하기 때문에 전체 반사파형의 파형도 가우시언형태와 매우 유사함을 살펴볼 수 있다. 마지막으로 Fig. 18의 수목영역에서 생성된 반사파형은 경우에 따라 그 형태가 매우 복잡하며, 서브빔이 수목을 투과하고 지표면까지 도달한 경우 반사파형의 파형의 끝부분에서 미약하게 지표면으로부터 되돌아오는 반사파를 확인할 수 있었다. 시뮬레이션을 통해 생성된 레이저빔의 반사파형에 peak detection 방법을 적용하여 리턴펄스의 반사시각을 계산하여 별모양의 심볼로서 가시화하였다.

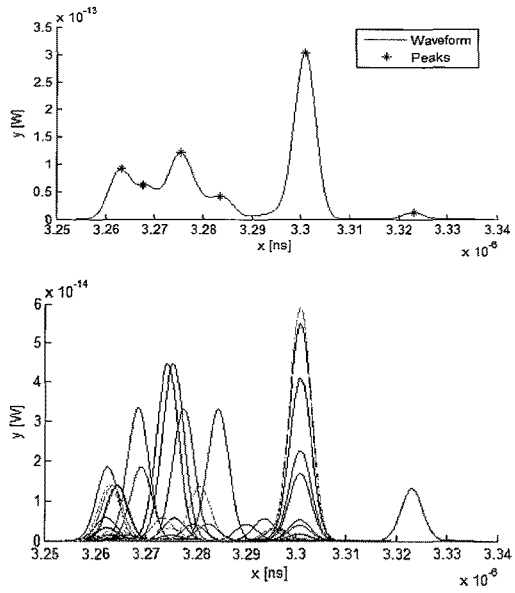

Fig. 18. Waveforms of the laser beam (top) and sub-beams (bottom) of a tree.

Fig. 19, Fig. 20, Fig. 21은 각각 건물, 지형, 수목영역에서의 서브빔의 반사지점과 계산된 레이저빔의 반사위치를 보여주고 있다. 건물영역의 시뮬레이션 결과 레이저빔을 중심으로 생성된 서브빔들이 건물 모서리와 인접하고 있는 지면에서 반사하였음을 알 수 있다. 지표면에서 반사한 서브빔들은 모두 동일한 높이를 갖는 지점에서 반사하였으며, 수관내부영역의 서브빔들은 랜덤한 위치에서 반사함을 알 수 있다.

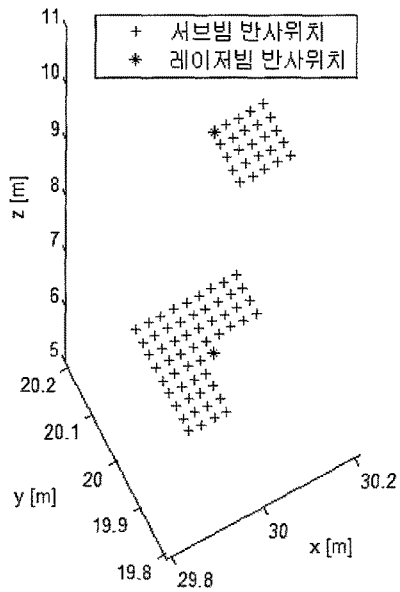

Fig. 19. Reflected locations of sub-beams (cross) and laser beam (star) on the corner area of the building.

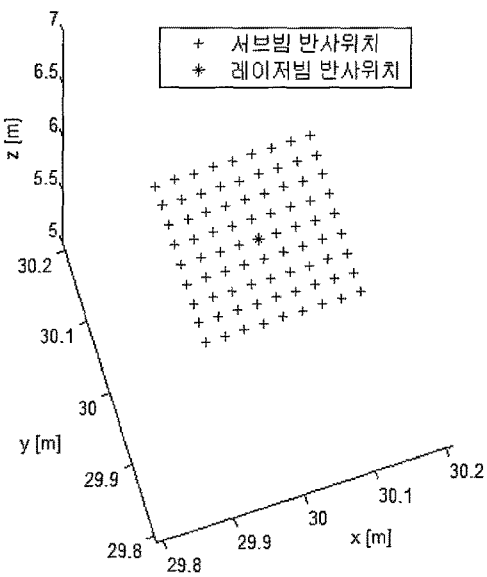

Fig. 20. Reflected locations of sub-beams (cross) and laser beam (star) on the surface.

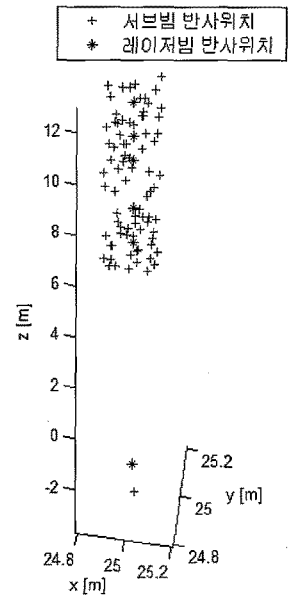

Fig. 21. Reflected locations of the sub-beam (cross) and laser beam (star) inside the tree.

4. 결 론

본 연구에서는 시뮬레이션을 통해 FW 라이다 시스템에 취득되는 반사파형(waveform)을 모의 생성하고자 하였다. 이를 위해 라이다시스템을 구성하는 개별센서와 이로부터 생성되는 레이저빔과 객체간의 기하학적인 모델링을 수행하여 레이저빔이 이동한 거리와 시간을 계산하고, 이를 기반으로 반사파 모델링을 통해 레이저빔의 에너지 변화량을 계산하여 보았다. 그리고 가상의 모의 객체모델에 이를 적용하여 제안한 방법의 효용성을 살펴보았다. 실험에 사용한 객체는 지형, 건물, 수목이며, 실험결과 각기 특성에 따른 반사파형 데이터를 생성할 수 있었다. 본 연구의 결과는 라이다 센서의 설계 및 성능 예측과 센서 데이터 처리 알고리즘 개발을 위한 시험 데이터의 경제적인 생성에 효과적으로 사용될 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 한국과학기술원 영상정보특화연구센터의 II-21 "레이저 영상 신호특성모델링 기법 연구" 과제를

통한 방위사업청과 국방과학연구소의 연구비 지원으로 수행되었습니다(계약번호 UD070007AD).

참고문헌

김성준, 민성홍, 이임평, 최경아, 2008. 항공라이다시스템의 기하모델링 및 데이터 시뮬레이션, 한국측량학회지, 26(3): 311-320.

김성준, 이임평, 2009a. 서브빔 처리를 통한 라이다 Waveform 시뮬레이션, 한국측량학회 춘계학술발표회 논문집, 321-324.

김성준, 이임평, 2009b. 통계/기하학적 수목 모델을 이용한 LIDAR Waveform 시뮬레이션, 감시 · 정찰 · 정보 학술대회, 76.

장수영, 1993. 데이터모델로서의 나무모델 형성 및 수정기법, 한국통신학회 학술대회 논문집, 367-373.

최윤석, 류승택, 윤결현, 1996. 스크립트 파일을 이용한 나무 형태의 모델링 및 렌더링, 한국정보과학회 학술발표논문집, 449-452.

Ackermann, F., 1999. Airborne laser scanning-present status and future expection, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54(2-3): 64-67.

Persson, Å., U. Soderman, J. Topel and S. Ahlberg, 2005. Visualization and analysis of full-waveform airborne laser scanner data, Proceedings of International Archives of Photogrammetry, Enschede, Netherland, Sep.12-Sep15, 2005. Vol.36, 103-108.

Blanquer, E., 2007. LADAR Proximity Fuze-System Study, Stockholm, MA, Sweden.

Chauve, A., C. Mallet, F. Bretar, S. Durrieu, M. P. Deseilligny and W. Puech, 2007. Processing full-waveform LiDAR data: modelling raw signals, Proceedings of ISPRS Workshop on Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007, Espoo, Finland, Sep.12-Sep.14, 2007. Vol.3, 102-107.

Eugene, H., 2002. Optics: International Edition.

Ene, L., E. Næsset and T. Gobakken, 2007. Simulating Sampling Efficiency in Airborne laser Scanning Based Forest Inventory, Proceedings of ISPRS Workshop on Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007, Espoo, Finland, Sep.12-Sep.14, 2007. Vol.3, 114-118.

Filin, S. and B. Csatho, 2000. An Efficient algorithm for the Synthesis of Laser Altimetry Waveforms, BPRC Technical Report No. 2000-02, The Ohio State University, Columbus.

Kim, S., S. Min, G. Kim, I. Lee and C. Jun, 2009. Data Simulation of an Airborne LIDAR System, Proceedings of the SPIE, Orlando, FL, Apr.15, 2009. Vol.7323, 7323C.

Mallet, C. and F. Bretar, 2009. Full-waveform topographic lidar: state-of-the-art, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 64(1): 1-16.

Pack, R. T., D. Saunders, R. Fullmer and S. Budge, 2006. The simulation of automatic ladar sensor control during flight operations using USU LadarSIM Software, Proceedings of SPIE, Orlando, FL, Apr.19-Apr.20, 2006. Vol.6214, 62140L.

Ping Tan, Gang Zeng, Jingdong Wang, Sing Bing Kang, Long Quan., 2007. Image-based tree modeling, Proceedings of ACM SIGGRAPH 2007, San Diego, CA, Aug.05-Aug.09, 2007. 87.

Reitberger, J., P. Krzystek, and U. Stilla, 2008. Analysis of full waveform LIDAR data for the classification of deciduous and coniferous trees, *International Journal of Remote Sensing*, 29(5): 1407-1431.

Steinvall, Ove K. and T. Carlsson, 2003. Three-dimensional laser radar modelling, Proceedings of SPIE, Orlando, FL, Apr.17, 2003. Vol.4377, 23-34.

Telgarsky, R., M. C. Cates, C. Thompson and J. N. Sanders-Reed, 2004. High fidelity LADAR simulation, Proceedings of SPIE, Orlando, FL, Apr.13-Apr.15, 2004. Vol.5412, 194-207.

Wagner, W., A. Ullrich, T. Melzer, C. Briese and K. Kraus, 2004. From single-pulse to full-waveform airborne laser scanners: potential and practical challenges, Proceedings of IAPRS XXth Congress, Istanbul, Turkey, Jul.12-Jul.20, 2004. Vol.XXXV, 201-206.

Wagner, W., A. Ullrich, V. Ducic, T. Melzer and N. Studnicka., 2006. Gaussian decomposition and calibration of a novel small-footprint full-waveform digitising airborne laser scanner, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 60(2): 100-112.

Wagner, W., Roncat A, Melzer T and Ullrich A, 2007. Waveform analysis techniques in airborne laser scanning, Proceedings of ISPRS Workshop on Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007, Espoo, Finland, Sep.12-Sep.14, 2007. Vol.3, 413-418.