가이거모드 영상 LADAR 시스템의 시뮬레이션과 성능예측

Simulation and Performance Assessment of a Geiger-mode Imaging LADAR System

김 성 준*

Seongjoon Kim

이 임 평*

Impyeong Lee

이 영 철**

Youngcheol Lee

Abstract

LADAR systems can rapidly acquire 3D point clouds by sampling the target surfaces using laser pulses. Such point clouds are widely used for diverse applications such as DSM/DTM generation, forest biomass estimation, target detection, wire avoidance and so on. Many kinds of LADAR systems have been developed with their respective purposes and applications. Particularly, Geiger mode imaging LADAR systems are increasingly utilized since they are energy efficient thank to extremely sensitive detectors incorporated into the systems. The purpose of this research is the performance assessment of a Geiger mode imaging LADAR system based on simulation with the real system parameters. We thus developed a simulation method of such a LADAR system by modeling its geometric, radiometric, optic and electronic aspects. Based on the simulation, we performed the performance assessment of a newly designed system to derive the outlier ratio and false alarm rate expected during its operation in almost real environment with reasonable system parameters. The proposed simulation and performance assessment method will be effectively utilized for system design and optimization, and test data generation.

Keywords : LADAR(레이저레이다), Imaging LADAR(영상 레이저레이다), Geiger Mode(가이거 모드), Sensor Model(센서모델), Simulation(시뮬레이션), Geometric Model(기하모델), Radiometric Model(복사모델), Detector Model(검출기모델), Performance Assessment(성능평가)

1. 서 론

LADAR 시스템은 레이저 펄스를 이용하여 대상물의

3차원 표면을 조밀하게 샘플링(sampling)해서 점데이터(3D point cloud) 및 거리영상(range image)를 출력하는 능동형 원격센서 시스템이다. 주로 지형매핑(terrain mapping), 유물/유적지 재현(reconstruction), 해안선 측량(coastline extraction), 수목생체량 추정(forest biomass estimation) 등의 목적으로 많이 활용되고 있다. 특히, 국방 분야에서는 유무인 플랫폼에 탑재된 LADAR 시스템을 이용하여 비접근지역의 지형이나 표적을 정찰/

† 2012년 5월 31일 접수~2012년 8월 24일 게재승인

* 서울시립대학교(The University of Seoul)

** 국방과학연구소(ADD)

책임저자 : 이임평(iplee@uos.ac.kr)

감시하거나, 지능형 유도무기에 탑재되어 표적을 탐지하는 탐색기(seeker)로의 역할을 수행하기도 한다. 또한 헬리콥터와 같은 회전익플랫폼에 탑재되어 전선(power line), 철탑 등의 비행장애물 탐지^[4]에도 유용하게 활용되고 있다.

활용목적에 따라 다양한 종류의 LADAR 시스템이 개발되고 있다. 사용하는 검출기의 배열크기에 따라서 단요소 시스템(single element system)과 FPA(Focal Plane Array) 시스템으로 구분할 수 있다. 전자는 1 by 1의 single 픽셀만을 지닌 검출기를 의미하며, 후자는 n by m개의 픽셀 배열구조(FPA : Focal Plane Array)를 갖는 검출기를 말한다. 지형 표면을 정밀하게 샘플링한 3D point cloud를 주로 사용하는 지형매핑분야에서는 스캐닝(scanning) 장치와 함께 단요소 시스템을 사용하고^[1,8,10,14], 실시간으로 표적에 대한 영상정보가 필요한 국방 분야나 자율주행을 위한 로봇공학분야에서는 FPA 시스템을 사용한다.

검출기의 특성에 따라서는, 입사되는 광자의 개수에 비례하여 수신된 레이저 반사파형(full waveform)을 출력하는 선형 모드(linear mode) 시스템과 하나의 광자가 수신되더라도 포화(saturation)되는 극민감도의 성능을 지닌 가이거 모드(geiger mode) 시스템이 있다. 수목생체량 추정 연구를 하는 산림분야에서는 수목의 표면뿐만 아니라 수목아래의 지표면에도 관심이 많기 때문에 반사파형을 출력하는 선형 모드 시스템을 주로 사용한다. 가이거 모드 시스템은 대기에 의한 에너지 감쇄가 심한 상황에서도 높은 검출효율을 나타낸다. 따라서 송신에너지를 크게 낮출 수 있으며, 이를 이용하면 보다 에너지 효율이 높은 LADAR 시스템을 개발할 수 있어서 최근 많은 연구가 이루어지고 있다^[6].

이와 같은 다양한 종류의 LADAR 시스템을 개발하기 위해서는 시뮬레이션 연구가 필수적으로 선행되어야 한다. 실제 하드웨어 시스템을 개발하기 전에 시뮬레이션을 통하여 개발될 LADAR 시스템의 성능을 예측하고 활용 목적에 적합한지를 분석할 수 있기 때문이다. 또한, LADAR 시스템을 비행플랫폼에 탑재하여 실측 데이터를 직접 취득하지 않고, 시뮬레이션을 이용하여 사용자가 원하는 데이터를 쉽게 생성할 수 있어서, 활용분야의 어플리케이션(알고리즘) 개발을 위한 입력데이터로 제공할 수 있다^[10].

LADAR 시뮬레이션에 관한 선행 연구들을 살펴보면 크게 단요소 시스템의 시뮬레이션과 FPA 시스템의 시뮬레이션으로 분류할 수 있다. 단요소 시스템의 경우

주로 지형매핑 목적으로 사용하기 때문에 기하시물레이션 연구가 많이 수행되었으며, 이를 수행한 연구는 다음과 같다. Lohani 등(2007)은 기하시물레이션을 통해 모의 point cloud를 생성하였으며^[11], Kukko 등(2009)은 시물레이션을 통해 생성된 point cloud를 실측데이터와의 비교를 수행하였다^[10]. Schenk(2001)는 LADAR 시스템의 정밀한 기하학적 모델링을 통해 기하학적으로 발생하는 시스템오차에 관한 연구를 수행하였다^[14]. Filin와 Csatho(2000)는 기하와 복사학적 시물레이션으로 ICESat 위성에 탑재되어 있는 GLAS(Geoscience Laser Altimeter System)의 성능예측과 검증하였다^[5].

FPA 시스템의 시물레이션에 관한 연구는 대부분 거리영상을 입력데이터로 사용하였으며, 영상픽셀과 검출기의 픽셀간의 기하학적인 관계에서 수신되는 에너지로부터 반사파형을 생성하였다. 특히 Blanquer(2007)는 선형 모드 영상 LADAR의 센서 모델링을 기반으로 시물레이션을 수행하고 시스템 변수가 달라짐에 따른 출력 영상데이터가 어떻게 달라지는지를 분석하였다^[3]. O'Brien 등(2005)은 가이거 모드 검출기에 대한 시물레이션을 수행하고, 이를 실측데이터와 비교하였다^[6].

기존의 연구들을 분석한 결과 단요소 시스템의 시물레이션의 경우 기하시물레이션에 치중하여 복사/광학/전자적인 연구가 미비하였다^[10,11]. 반면에 FPA 시스템의 시물레이션의 경우에는 대부분 거리영상을 입력데이터로 사용함으로써^[3,4,12], LADAR 시스템을 구성하는 서브모듈 - GPS, INS, Laser scanner의 개별 및 통합적인 시스템 오차에 대한 고려가 미비하였다.

본 연구에서는 기하/복사/광학/전자적인 측면을 종합적으로 고려하여 1) 가이거 모드 영상 LADAR 센서에 대한 시물레이션 기법을 제시한다. 그리고 2) 실제와 유사한 시스템 및 환경변수를 입력하여 생성된 모의데이터를 분석하여 LADAR 시스템의 검출성능을 예측하고자 한다.

2. 시뮬레이션 방법

가. 방법론의 개요

LADAR 시스템은 하나의 레이저 빔을 발사하여 되돌아오는 신호를 감지하고, 이들의 시간차(TOF)를 이용하여 거리영상과 point cloud를 생성한다. Fig. 1은 LADAR 시스템에서 검출기가 거리영상을 생성하는 원리를 보여주고 있다. Fig. 1을 살펴보면 검출기의 각

픽셀에 맺히는 정보는 픽셀의 중심과 초점(focal point)을 지나는 직선(sub-beam ray)이 표적과 교차하는 지점까지의 거리를 측정함으로써 얻어진다^[10].

Fig. 1. LADAR 시스템의 구조 및 거리영상을 생성하는 원리

그러나 시스템의 기하학적인 오차(error)와 검출기 픽셀에 수신되는 노이즈신호로 인하여, point cloud에는 노이즈가 포함된다. LADAR 시스템의 검출성능을 평가하기 위해서는 실제 LADAR 센서가 촬영한 데이터셋(실험군)과 동일한 조건이지만 검출기에 수신된 신호에 노이즈가 전혀 없는 즉, 이상적으로 참값인 데이터셋(대조군)이 필요하다. 본 연구에서는 실제와 유사한 시스템변수를 기반한 시뮬레이션을 통해 실험군과 대조군 데이터셋을 모의 생성한다. 여기에서 연구의 목적이 검출기의 검출성능을 예측하는 것이기 때문에 시스템의 기하학적인 오차가 존재하지 않는다고 가정하였다.

Fig 2는 본 연구의 전체 흐름을 도식화한 것이다.

1) 기하시뮬레이션은 주어진 센서위치와 자세, 표적 위치 등의 기하학적 요소를 이용하여, sub-beam ray와 표적간의 기하학적 관계를 수립하는 것이다. Fig. 3은 기하시뮬레이션을 위해 수행되어야 하는 모델들을 보여주는 그림이다. 먼저 검출기의 픽셀을 연결하는 sub-beam ray를 정의한다. 그리고 'ray-tracing'기법을 적용하여 ray와 교차하는 표면을 탐색하고, 교차점 point 좌표와 거리(range)를 계산한다. 생성된 point와 거리는 검출기의 검출특성이 반영되지 않았기 때문에 복사/검출시뮬레이션 결과에 대한 참값(Fig. 2에서 true point cloud)으로 사용할 수 있다.

2) 복사시뮬레이션에서는 기하시뮬레이션의 결과로 생성된 정보와 표적 반사도 등의 복사/광학적 요소를 이용하여 센서 수신부(receiver)가 받아들이는 에너지양을 계산한다. 여기에서 에너지란 발사된 레이저 에너지뿐만 아니라 후방산란된 태양복사 에너지 및 검출단의 열적 원인에 의해 발생하는 노이즈를 의미한다.

Fig. 4는 복사시뮬레이션을 위해 본 연구에서 수행한 모델링의 범위를 보여주는 그림이다. 복사시뮬레이션은 단위 시간(time bin) 동안 검출기의 개별 픽셀이 수신하는 광자개수의 기댓값을 출력한다.

Fig. 2. 시뮬레이션 기반의 LADAR 검출성능 분석을 위한 방법론

Fig. 3. 기하시뮬레이션을 위한 모델링 요소

Fig. 4. 복사시뮬레이션을 위한 모델링 요소

3) 검출시뮬레이션에서는 Fig. 5와 같이 실제 검출기의 특성을 반영하는 확률모델을 이용하여 검출기가 광자를 검출이 시각을 모의수행 한다. 그리고 모의 생성된 검출시각으로부터 거리를 재계산하고 이를 다시 ray모델에 대입하여 point cloud를 생성한다. 검출시뮬레이션 결과로 생성된 point cloud는 실제 LADAR 시스템의 전체 특성을 반영하는 최종결과물이다.

마지막 단계인 4) 검출성능 예측에서는 검출시뮬레이션으로 생성된 point cloud(실험군)와 기하시뮬레이션으로 생성된 point cloud(대조군)를 비교분석함으로써 주어진 시스템 변수를 반영하는 LADAR 시스템의 검출성능을 평가한다. 일반적으로 동일한 영역에 대한 두 point cloud는 공액점쌍(conjugate pair)을 찾을 수 없기 때문에 점간 비교가 불가능하지만, 시뮬레이션을 기반으로 생성된 모의데이터는 모든 점에 대하여 공액점을 알고 있기 때문에 점 기반의 직접비교가 가능하다.

Fig. 5. 검출시뮬레이션을 위한 모델링 요소

나. 기하시뮬레이션^[8]

실제 플랫폼에 탑재되는 LADAR 시스템은 레이저 스캐너(laser scanner) 뿐만 아니라 GPS/INS도 탑재되어 센서의 위치와 자세 정보를 제공한다. 이러한 센서 데이터를 기반으로 획득된 영상데이터에서 개별 픽셀의 정확한 절대좌표를 알기 위해선, 센서방정식(sensor equation)을 이용하여야 한다. 센서방정식은 LADAR, GPS, INS의 기하학적 관계를 기반으로 레이저 펄스가 반사한 지점의 3차원 좌표를 계산하기 위한 수학적 모델이다. Fig. 6은 플랫폼에 탑재되는 3개의 센서와 그 관계를 보여주고 있다. GPS, INS, LS(Laser Scanner)는 각각 원점과 자세가 다르며 출력 데이터도 센서고유의 좌표계를 기준으로 생성된다. 센서방정식은 이러한 개별센서 좌표계를 하나의 공통좌표계로 통합한 것이며, 이를 식으로 표현하면 식 (1)과 같다.

식 (1)에서 r 은 검출기 픽셀에 해당하는 서브빔 펄

스가 이동한 거리로써 LS좌표계의 원점(초점)에서 표적점까지 거리를 의미한다. u_0 는 검출기 픽셀과 초점을 지나는 서브빔 펄스의 방향벡터(3×1)이다. R_{0L} 은 스캐닝장치에 의해 서브빔 펄스가 굴절되는 것을 반영하기 위한 3차원 회전변환 행렬(3×3)을 나타낸다. R_{LL} 은 레이저 스캐너 좌표계를 INS 좌표계로 변환하는 회전행렬(3×3)이다. 이는 IMU 센서와 LS의 자세차이를 의미한다. R_{IW} 는 INS 좌표계를 WGS84(절대좌표계) 좌표계로 변환하는 회전행렬(3×3)이다. 이는 INS의 출력 값으로부터 계산된다. t_{LL}^W 는 WGS84 좌표계 기준의 IMU 센서와 LS간의 이동벡터(offset, 3×1)이다. 마지막으로 t_{IW}^W 는 WGS84 좌표계 원점과 IMU 위치를 연결하는 이동벡터(3×1)로써 WGS84 좌표계 기준의 IMU 센서의 위치좌표를 의미하며, 이는 INS로부터 출력된다.

Fig. 6. 좌표계간의 기하학적 관계

$$P^W = R_{IW} R_{LL} R_{0L} u_0 \cdot r + t_{LL}^W + t_{IW}^W \quad (1)$$

다. 복사시뮬레이션

검출시뮬레이션을 수행하기 위해서는 검출기의 개별 픽셀에 입사하는 에너지의 광자개수를 알아야 한다. 이는 곧 픽셀에 수신되는 에너지를 모델링하여야 함을 의미한다. 이상적인 LADAR 시스템은 표적으로 발사(송신)한 레이저 에너지만이 검출기에 수신되지만, 실제 LADAR 검출기에는 발사한 레이저 에너지뿐만 아니라 후방산란(backscattering)된 태양복사 에너지도 입사하게 된다. 또한 검출기 자체에 흐르는 암전류에 의해 오류검출이 일어나기도 한다. 따라서 이러한 요소에 대한 모델링이 필요하다.

먼저, 디텍터의 각 픽셀에 수신되는 에너지를 계산하기 위해서는 픽셀과 상응하는 서브빔 펄스의 송신 에너지를 알아야 한다. 이는 레이저 빔 프로파일(beam profile)로써 계산할 수 있다.

빔 프로파일은 레이저 빔의 횡단면상에서의 에너지

분포에 대한 모델로써 일반적으로 가우시언 빔프로파일 많이 사용된다. 식 (2)는 가우시언 빔프로파일 (Gaussian beam profile) 모델을 표현하는 식이다^[3]. $I(r)$ 은 빔의 중심축으로부터 r 만큼 떨어진 지점의 에너지 강도를 의미하며, I_0 는 빔의 횡단면상에서 가장 높은 에너지 강도 값이다. w 는 횡단면상에서 빔의 중심으로부터 경계선까지의 반경이다.

$$I(r) = I_0 e^{\left(-2 \frac{r^2}{w^2}\right)} \quad (2)$$

본 연구에서는 식 (3)을 거쳐 식 (4)와 같이 검출기 픽셀의 위치에 해당하는 빔프로파일의 에너지강도 분포비율을 이용하여 각 픽셀의 서브 펄스에너지를 계산하였다. 식 (3)에서 시스템이 발사되는 빔파워가 Pt 라고 할 때, 펄스당 에너지는 펄스반복률($f_{repetition}$)로 나눠줌으로써 계산할 수 있다. 그리고 빔프로파일을 기반으로 하나의 펄스에너지를 각 픽셀에 배분한다. $dist(r,c)$ 는 검출기의 중심으로부터 해당 픽셀까지의 거리를 의미하며, 식 (4)에서 Nor 는 정규화(normalize)를 의미한다. 식 (4)를 통해 우리는 펄스당 개별 픽셀에 해당하는 송신 에너지를 계산할 수 있게 된다.

$$Et_{pulse} = \frac{Pt}{f_{repetition}} \quad (3)$$

$$Et_{r,c} = Nor \left(e^{-2 \frac{dist(r,c)^2}{w^2}} \right) \cdot Et_{pulse} \quad (4)$$

Fig. 7은 16×16개의 픽셀로 이루어진 검출기의 펄스당 송신 에너지(Joule)를 가시화한 모습이다.

레이저 펄스는 시간(time domain)에 따라서도 에너지가 변하기 때문에 펄스모델을 고려하여 시간에 따른 에너지 변화도 모델링해야 한다. 본 연구에서는 Carlsson 등(2001)이 정의한 가우시언 모델을 기반으로 펄스모델을 유도하였다. 식 (5)는 Carlsson 등(2001)의 연구에서 정의된 가우시언 펄스모델이며, Fig. 8은 이를 가시화한 모습이다^[3]. $p(t)$ 는 특정시간 t 에서의 에너지를 의미하며 $T_{1/2}$ 는 펄스의 반치폭(FWHM : Full Width at Half Maximum)이다.

$$p(t) = (t/\tau)^2 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}, \tau = \frac{T_{1/2}}{3.5} \quad (5)$$

Fig. 7. 16×16 FPA 디텍터의 각 픽셀별 에너지

Fig. 8. Carlsson 등(2001)이 제안한 펄스모델

식 (5)를 본 연구에 맞게 변형하면 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다. t_r 은 기하시뮬레이션을 통해 계산된 초점으로부터 표적점까지의 거리로 계산된 펄스의 이동 시간이며, 빔프로파일과 유사하게 펄스모델을 정규화하고 여기에 픽셀에 해당하는 송신파스 에너지를 곱한다. Et_{r,c,t_k} 는 r, c 픽셀에 해당하는 k 번째 단위시간(δ_t)동안의 에너지를 의미한다.

$$Et_{r,c,t_k} = Nor \left[\left(\frac{t_k - t_r}{\tau} \right)^2 \cdot e^{-\frac{t_k - t_r}{\tau}} \right] \cdot Et_{r,c} \quad (6)$$

특정시간에서 픽셀에 해당하는 송신에너지로부터 수신에너지를 계산하기 위해서는 식 (7)의 레이저 거리식(laser range equation)을 사용한다^[7]. 식 (7)에서 첫 번째 term은 특정 시간에서의 픽셀에 해당하는 송신에너

지를 나타내며, 여기에 두 번째 term에서는 에너지가 빔폭(θ_t)으로 표적까지의 거리 R 만큼 이동했을 때의 단위 면적당 에너지를 의미한다. 세 번째 term은 송신된 레이저 에너지가 표적에서 반사하여 센서 수신부까지 되돌아오는 동안의 에너지 변화를 나타내고 있다. σ 는 LCS(Laser radar Cross Section)^[7]로서 송신된 레이저 에너지에 대한 표적에서의 반사량을 의미한다. 식 (8)에서와 같이 반사량(σ)은 표적의 면적(A), 반사도(ρ_t)와 비례관계에 있다. Ω_t 는 레이저빔이 표적에서 반사하는 scattering beam width(unit : steradian solid angle)을 의미한다. 여기에서 표적 표면의 면적이 빔의 영역(foot print)보다 크고 Lambertian 표면(extended Lambertian target)이라는 전제^[7]하에 Ω_t 는 π 가 된다. 그리고 cosine emission law에 따라 반사량(σ)은 레이저빔의 LOS(Line Of Sight)와 표적 표면 법선 사잇각(θ , 입사각)의 cosine에 대해 비례한다. A 는 식 (9)와 같이 쓸 수 있으며, 이를 정리하면 식 (10)과 같이 전개된다. 식 (7) 네 번째 term은 LADAR 시스템의 수신부(receiver)까지 도달한 단위 면적당 반사에너지(W/m^2)에 조리개 면적을 곱함으로써 최종적으로 센서 수신부에 들어오는 에너지를 계산한다. 마지막으로 η_{atm} 과 η_{sys} 는 각각 대기과 시스템의 에너지 효율이다. η_{atm} 은 식 (11)과 같이 표적까지 이동할 때 발생하는 대기감쇄율 T_{atm_t} 과 수신부로 되돌아올 때 발생하는 대기감쇄율 T_{atm_r} 의 곱으로 계산되며, 두 대기감쇄율이 같다는 가정 하에 T_{atm}^2 으로 사용할 수 있다. η_{sys} 는 LADAR 시스템에서 레이저빔을 송수신할 때 광학 장치에 의해 발생하는 에너지 감쇄율로서, 식 (12)와 같이 band pass filter(T_{BPF}), PL filter(T_{PLF}), Neutral attenuation(T_{NA}), pixel fill factor(T_{FF})의 곱으로 계산된다. 식 (13)은 식 (7)을 본 연구에서 사용할 모델로 재 정리한 수식이다.

$$E_{r,c,t_k}^{ls} = E_{r,c,t_k} \cdot \frac{4}{\pi R^2 \theta_t^2} \cdot \frac{\sigma}{4\pi R^2} \cdot \frac{\pi D^2}{4} \cdot \eta_{atm} \eta_{sys} \quad (7)$$

$$\sigma = \frac{4\pi}{\Omega_t} \rho_t A \cos(\theta) \quad (8)$$

$$A = \pi \left(\frac{R \cdot \theta_t}{2} \right)^2 \quad (9)$$

$$\sigma = \pi \rho_t R^2 \theta_t^2 \cos(\theta) \quad (10)$$

$$\eta_{atm} = T_{atm_t} T_{atm_r} = T_{atm}^2 \quad (11)$$

$$\eta_{sys} = T_{BPF} T_{PLF} T_{NA} T_{FF} \quad (12)$$

$$E_{r,c,t_k}^{ls} = \frac{E_{r,c,t_k} \rho_t \cos(\theta) D^2 T_{atm}^2 T_{BPF} T_{PLF} T_{NA} T_{FF}}{4R^2} \quad (13)$$

식 (13)으로 계산된 수신 에너지를 단위 광자에너지로 나누면 식 (14)와 같이 검출기가 검출하는 광자개수의 기댓값을 산출할 수 있다.

$$E[N_{r,c,t_k}^{ls}] = \frac{E_{r,c,t_k}^{ls}}{h\nu} = \frac{E_{r,c,t_k}^{ls} \cdot \lambda}{hc} \quad (14)$$

h 는 플랑크상수($6.62606896 \times 10^{-34}$ J·s), ν 는 빛의 진동수이며, 이는 다시 빛의 속도(c)와 파장(λ)로 나타낼 수 있다.

표적에서 후방산란에 의해 센서로 입사되는 태양복사 에너지는 식 (15)와 같다. 첫 번째 term에서 E_{si} 는 태양 분광 복사조도(solar irradiance, $W/m^2/nm$)이고, δ_λ 는 spectral bandwidth이다. 이 term은 단위시간(δ_t)동안 단위면적에 입사하는 태양복사 에너지이며, 두 번째부터 네 번째의 term은 레이저 거리 식의 의미와 동일하다. 레이저 거리 식과 같이 식 (16)에서 식 (18)을 이용하면 최종적으로 식 (19)를 유도할 수 있다. 식 (19)를 통해 계산된 후방 산란된 태양복사 에너지를 단위 광자에너지로 나누면, 식 (20)과 같이 LADAR 검출기의 한 픽셀에 수신되는 광자개수 기댓값을 산출할 수 있다.

$$E^{sr} = E_{si} \delta_\lambda \delta_t \cdot \frac{\sigma}{4\pi R^2} \cdot \frac{\pi D^2}{4} \cdot \eta_{atm} \eta_{sys} \quad (15)$$

$$\sigma = \frac{4\pi}{\Omega_t} \rho_t A = \frac{4\pi}{\Omega_t} \rho_t \cdot (R \cdot IFOV)^2 = 4\rho_t \cdot R^2 \cdot IFOV^2 \quad (16)$$

$$\eta_{atm} = T_{atm} \quad (17)$$

$$\eta_{sys} = T_{BPF} T_{PLF} T_{NA} T_{FF} \quad (18)$$

$$E^{sr} = E_{si} \delta_{\lambda} \tau_g \rho_t IFOV^2 \frac{D^2}{4} T_{atm} T_{BPF} T_{PLF} T_{NA} T_{FF} \quad (19)$$

$$E[N^{sr}] = \frac{E^{sr}}{h\nu} = \frac{E^{sr} \cdot \lambda}{hc} \quad (20)$$

열적원인으로 발생한 암전류에 의해서도 검출기 픽셀은 광자검출을 하는 오류를 일으킨다. 암전류에 의해 발생하는 광자(전하)의 개수는 식 (21)과 같이 계산할 수 있다. $E[N_{dc}]$ 는 암전류의 발생빈도(dark current rate)가 f_{dc} 일 때 단위시간(δ_t) 동안 발생하는 전하의 개수의 기댓값을 의미한다^[2].

$$E[N^{dc}] = f_{dc} \cdot \delta_t \quad (21)$$

앞에서 서술된 모델 식으로부터 특정시간에서 검출기 픽셀에 입사되는 광자의 총 개수는 식 (22)와 같이 나타낼 수 있다. 암전류에 의한 광자는 센서내부에서 발생하는 것이기 때문에 PDE(Photon Detection Efficiency)의 영향을 받지 않는다.

$$E[N_{r,c,t_k}] = PDE \left(E[N_{r,c,t_k}^{ls}] + E[N^{sr}] \right) + E[N^{dc}] \quad (22)$$

라. 검출시뮬레이션^[12]

시뮬레이션을 수행하기 위해서는 검출기의 각 픽셀에 입사되는 광자의 개수를 변수로 사용하는 통계적 확률모델을 이용한다. O'Brien 등의 연구(2005)에 의하면 가이저 모드 검출기(Geiger mode APD)의 검출 특성은 Poisson 확률분포를 따른다. 특정시간에 해당하는 $\text{bin}(t_k)$ 에서 m 개의 광자가 검출될 확률은 식 (23)과 같다.

$$P(m; t_k) = \frac{1}{m!} [E(N_{r,c,t_k})]^m \cdot \exp[-E(N_{r,c,t_k})] \quad (23)$$

가이저 모드에서는 m 이 1보다 큰 경우 즉, 한 개의 광자라도 입사가 될 경우 검출이 이루어지기 때문에 디텍터의 픽셀이 광자를 검출할 확률은 식 (24)와 같이 광자가 하나도 입사되지 않을 확률($m = 0$)의 여사건이 된다.

$$P(t_k) = 1 - \exp[-E[N_{r,c,t_k}]] \quad (24)$$

위와 같은 이론을 바탕으로 본 연구에서는 다음과 같은 검출시뮬레이션을 수행하였다.

- (1) 단위시간(bin)당 픽셀에 수신되는 광자수의 기댓값을 계산한다(Fig. 9).

Fig. 9. 단위시간(bin)별 광자개수 분포

- (2) 계산된 광자수의 기댓값을 식 (24)에 대입하여 각 bin별 검출확률을 계산하여 PDF(Probability Distribution Function)를 생성한다(Fig. 10).

Fig. 10. bin(bin)별 검출확률분포(PDF)

- (3) PDF를 따르는 모의 검출시간을 생성하기 위해 식 (25)와 같이 누적분포함수(CDF : Cumulative Distribution Function)를 생성한다(Fig. 11).

$$CDF(k) = \sum_{i=1}^k P(t_i) \quad (25)$$

- (4) Fig. 11에서 y축 상에 0에서 1사이의 균등분포(uniform distribution)를 따르는 난수(random number)

를 발생시켜 y 값을 결정하고 그 값에 상응하는 bin을 탐색한다. 탐색된 bin에 해당하는 시각은 곧 픽셀이 광자를 검출한 시각이 된다. 난수 y 가 $0 \sim y_1$ 또는 $y_4 \sim 1$ 이면 픽셀이 광자를 검출하지 못하는 경우이며, $y_1 \sim y_2$ 일 때는 노이즈에 의해 검출이 발생한 경우를 의미한다. $y_2 \sim y_3$ 일 때는 픽셀이 수신된 레이저 에너지에 의해 검출이 이루어진 경우이다.

Fig. 11. 검출확률에 대한 누적분포함수(CDF)

3. 성능예측 실험 및 결과

제안한 방법을 적용하여 모의 LADAR 데이터를 생성하고, 이를 이용해 LADAR 시스템의 검출성능을 분석해 보았다. 가이거 모드 LADAR 센서는 NEP(Noise Equivalent Power)가 single photon 수준의 극민감도를 가지고 있기 때문에 검출기의 오류경보 확률은 LADAR 시스템 성능분석에서 중요한 요소이다.

검출기의 검출 성능을 분석하기 위해 먼저 기하학적 시뮬레이션만을 수행한 모의데이터를 만들었다. 이는 검출기가 반드시 레이저 펄스와 표적의 표면이 교차하는 지점만을 검출한다는 가정 하에 실행되었기 때문에, 검출기의 특성이 반영되지 않은 참값(true data, 대조군)이라고 할 수 있다. 그리고 실제와 유사한 시스템 검출특성을 반영한 시뮬레이션을 수행하여 모의 데이터를 생성하고, 이를 실험군으로 사용하였다. 여기에서는 본 연구에서 제안한 시뮬레이션 방법이 실제 하드웨어 시스템을 잘 반영하여 모의데이터가 실측과 매우 유사하다는 가정 하에 분석을 수행하

였다. Fig. 12는 입력데이터에서 표적이 되는 객체로써, 실제 서울특별시 영등포구 영등포동 일부 지역에 대한 모델이다. 지형은 불규칙삼각망(TIN : Triangle Irregular Network)으로 이루어져 있으며, 건물은 B-rep 기반의 다면체 모델로 생성하였다. Table 1은 시뮬레이션 실험을 위해 결정한 LADAR 시스템 및 환경변수 목록이다. LADAR 시스템은 비행 플랫폼에 탑재되어 연직방향으로 촬영하며, 플랫폼은 이동하지 않는다고 가정하였다.

Table 1. 시뮬레이션에 사용된 시스템변수

구분	변수	값
Laser	wavelength	1.560 nm
	laser mean power	10 w
	pulse frequency	25 kHz
	FWHM	1 nm
Scanning	deflection angle	0.506/0.506 0.256/0.256°
	rotational speed	45/-45 5/-5 회
	phase angle	0/0/90/90°
Acquisition	flight height	1 km
	speed	0 m/s
	operation time	0 ~ 0.1 s
Detector	detector	16 × 16
	sub pixel	1 × 1
	pixel pitch	100 um
	fill factor	0.9
	DCR	20 kHz
	PDE	0.3
	gate time	80 ns
	range span	200*2 m
Optic	neutral attenuation	33
	attenuation by BPF	0.5
	attenuation by PL	1.0
	optical pass band	2 nm
	transmitter efficiency	0.8
	receiver efficiency	0.75
	focal length	333 mm
Digitizing	digitizing clock	1 GHz
	minimum range	900 m
	maximum range	1,100 m
Environment	Solar Irradiance	0.3W/m ² /nm
	reflectivity	0.1

Fig. 12. 입력데이터로 사용한 도시모델(상 : 영등포동 일부 지역의 영상, 하 : 영등포동 3D모델 일부)

Fig. 13은 입력데이터로 사용된 객체모델과 기하 시뮬레이션을 통해 생성된 모의 LADAR point data의 영역(coverage)을 중첩시킨 그림이다. 총 640,000개의 point가 생성되었으며 영역의 범위는 x축으로 -19.512m ~ 19.525m, y축으로 -10.905m ~ 10.938m 이었으며, 점밀도는 746.464pts/m² 점간격은 0.297m로 나타났다. Fig. 14는 높이에 따른 color-coded point cloud를 보여준 그림이다.

한 스캐닝(0.1s) 동안 총 2,500번의 레이저 펄스가 발사되어 서브이미지가 만들어졌으며, 총 640,000개의 point 중 검출이 이루어진 점의 개수는 48,510개로 나타났다. Fig. 15는 최종적으로 생성된 모의 데이터(point cloud)를 보여주고 있으며, Fig. 16은 모의 point cloud 상의 이상점(outlier)을 제거한 후, 보간을 통해 생성한 거리영상(range image)이다.

Fig. 13. 시뮬레이션으로 생성된 Point Cloud와 입력모델을 중첩시킨 모습

Fig. 14. 기하학적 시뮬레이션만을 수행한 점군 (Point Cloud)

Table 2는 시뮬레이션을 통한 LADAR센서의 검출성능을 판단하기 위해 시뮬레이션 결과를 Error Matrix로 정리한 표이다. 시뮬레이션 실험 결과는 크게 네 개의 집단으로 분류할 수 있다. 분류 기준은 1) 해당 gate 내에서 실제 표적의 존재 유/무, 그리고 2) 시뮬레이션 결과인 검출/미검출 여부이다. Error Matrix에서 각 셀이 의미하는 바는 Table 3에서 기술하고 있다. 본 연구에서는 LADAR 센서의 검출성능을 평가하기 위한 지표로서 Table 2의 분석 결과를 기반으로 정확도, 성공률, 오류경보율, 이상점비율을 정의하였다 (Table 4).

Fig. 15. LADAR 시뮬레이션을 통해 최종적으로 생성된 Point Cloud

Table 2. 검출성능 분석을 위한 Error Matrix

구분		시뮬레이션	
		검출	미검출
표적	유	36,792/476 (G1/E0)	2,649 (E1)
	무	11,242 (E2)	588,841 (G2)

Fig. 16. 거리영상(Range Image)

Table 3. Error Matrix에서 Case별 의미

경우	설명
G1	Gate내에 표적이 있으며, 검출기도 이를 검출한 경우
G2	Gate내에 표적이 없으며, 검출기도 검출하지 않은 경우
E0	Gate내에 표적이 있지만, 노이즈에 의해 검출이 발생한 경우
E1	Gate내에 표적이 있지만, 검출기가 검출하지 못한 경우
E2	Gate내에 표적이 없지만, 노이즈에 의해 검출이 발생한 경우

Table 4. 검출 성능평가를 위한 지표

지표	값	설명 및 수식
정확도	76.83%	$\frac{G1 + E0}{G1 + E0 + E2}$
		시뮬레이션 결과로 검출된 것 중에서 실제로 표적이 존재하는 경우의 비율
성공률	93.36%	$\frac{G1 + E0}{G1 + E0 + E1}$
		실제 표적이 있을 때 검출기가 성공적으로 검출한 비율
오류 경보율	1.87%	$\frac{E2}{G2 + E2}$
		실제 표적이 없는데 검출기가 표적이 있는 것처럼 검출한 경우의 비율
이상점 비율	24.16%	$\frac{E0 + E2}{G1 + E0 + E2}$
		전체 검출된 결과 중에 이상점의 비율

4. 결 론

본 연구에서는 시뮬레이션에 기반한 가이저모드 영상 LADAR 센서의 검출성능 예측 및 평가를 수행하였다. 이를 위해 먼저 LADAR 센서모델을 바탕으로 모의데이터를 생성할 수 있는 시뮬레이션 기법을 제시하였으며, 이를 바탕으로 참값 데이터와 실제 시스템 제원으로 생성된 모의 LADAR 데이터를 분석하는 방법을 제안하였다. 제안된 방법을 적용한 결과 Table 1의 시스템 제원을 갖는 LADAR 시스템 검출기의 오류경보율은 약 1.87%로 나왔으며, 이때 전체 데이터에 노이즈가 약 24.16%의 비율로 발생함을 알 수 있었다.

본 연구는 LADAR 시스템 모델링에 기반한 시뮬레이션을 통해 생성된 참값과 모의데이터를 비교분석함으로써 센서의 검출성능을 예측하였다는 점에서 의의를 찾을 수 있지만, 실제 LADAR 시스템과의 비교를 통한 시뮬레이션 기법의 검증이 이루어지지 않았다는 점은 본 연구의 한계점이며, 이는 향후 연구에서 수행될 예정이다.

후 기

본 연구는 “3차원 LADAR 영상처리기법 연구” 과제(계약번호 : UD100028GD)와 한국과학기술원 영상정보특화연구센터의 II-21 “레이저 영상 신호특성모델링 기법 연구” 과제(계약번호 : UD070007AD)를 통한 방위사업청과 국방과학연구소의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

[1] 김성준, 민성홍, 이임평, “LADAR센서의 기하모델링 및 데이터 시뮬레이션”, 한국군사과학기술학회 종합학술대회, 2007. 6.

[2] Albota, M. A., Aull, B. F., Fouche, D. G., Heinrichs, R. M., Kocher, D. G., Marino, R. M., Mooney, J. G., Newbury, N. R., O'Brien, M. E., Player, B. E., Willard, B. C. and Zayhowski, J. J., “Three-dimensional Imaging Laser Radars with Geiger-mode Avalanche Photodiode Arrays”, Lincoln

Laboratory Journal, Vol. 13, No. 2, pp. 351~370, 2002.

[3] Blanquer, E., “LADAR Proximity Fuze-System Study”, Master's Degree Project, Stockholm, Sweden, 2007.

[4] Carlsson, T., Steinvall, O. and Letalick, D., “Signature Simulation and Signal Analysis for 3-D Laser Radar”, FOI-R-0163-SE, 2001.

[5] Filin, S. and Csatho, B., “An Efficient Algorithm for the Synthesis of Laser Altimetry Waveforms”, BPRC Technical Report No. 2000-02, The Ohio State University in Columbus, 2000.

[6] Itzler, M., Entwistle, M., Owens, M., Patel, K., Jiang, X., Slomkowski, K., Rangwala, S., Zalud, P., Senko, T., Tower, J. and Ferraro, J., “Geiger-mode Avalanche Photodiode Focal Plane Arrays for Three-dimensional Imaging LADAR”, Proceedings of the SPIE, San Diego, California, Vol. 7908, 2010.

[7] Jelalian, A. V., Laser Radar Systems, Artech house, 1992.

[8] Kim, S., Min, S., Lee, I., Choi, K., “Geometric Modeling and Data Simulation of an Airborne LIDAR System”, Journal of the Korean Society for Geospatial Information System, Vol. 26, No. 3, pp. 311~320, 2008.

[9] Kim, S., S. Min, G. Kim, I. Lee and C. Jun, “Data Simulation of an Airborne LIDAR System”, Proceedings of the SPIE, Orlando, FL, Vol. 7323, 2009.

[10] Kukko, A. and Hyypä, J., “Small-footprint Laser Scanning Simulator for System Validation, Error Assessment and Algorithm Development”, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 75, No. 9, pp. 1177~1189, 2009.

[11] Lohani, B. and Mishra, R., “Generating LiDAR Data in Laboratory : LiDAR Simulator”, International Archive of Photogrammetry and Remote Sensing, Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007, Espoo, Finland, 2007.

[12] O'Brien, M. and Fouche, D., “Simulation of 3D Laser Radar Systems”, Lincoln Laboratory Journal, Vol. 15, No. 1, pp. 37~60, 2005.

[13] Richmond, R. and Cain, S., Direct-Detection LADAR

Systems, SPIE Press, 2010.

- [14] Schenk, T., "Modeling and Analyzing Systematic Errors of Airborne Laser Scanners", Technical Notes

in Photogrammetry No. 19, The Ohio State University in Columbus, OH, 2001.