

맵핑용 3차원 영상 레이저 레이다의 시스템 설계 및 성능 분석

라종필^{*,1)} · 고진신²⁾ · 이창재³⁾

¹⁾ 삼성탈레스 전자광학체계그룹
²⁾ 소모홀딩스엔테크놀로지 IR 연구소
³⁾ 국방과학연구소 레이저센서기술팀

System Design and Performance Analysis of 3D Imaging Laser Radar for the Mapping Purpose

Jongpil La^{*,1)} · Jinsin Ko²⁾ · Changjae Lee³⁾

¹⁾ *Optronics System Group, Samsung Thales Co., Ltd., Korea*
²⁾ *IR Laboratory, SOMO Holdings & Tech. Co., Ltd., Korea*
³⁾ *Laser Sensor Technology Team, Agency for Defence Development, Korea*

(Received 20 August 2013 / Revised 11 December 2013 / Accepted 20 December 2013)

ABSTRACT

The system design and the system performance analysis of 3D imaging laser radar system for the mapping purpose is addressed in this article. For the mapping, a push-bloom scanning method is utilized. The pulsed fiber laser with high pulse energy and high pulse repetition rate is used for the light source of laser radar system. The high sensitive linear mode InGaAs avalanche photo-diode is used for the laser receiver module. The time-of-flight of laser pulse from the laser to the receiver is calculated by using high speed FPGA based signal processing board. To reduce the walk error of laser pulse regardless of the intensity differences between pulses, the time of flight is measured from peak to peak of laser pulses. To get 3D image with a single pixel detector, Risley scanner which stirs the laser beam in an ellipsoidal pattern is used. The system laser energy budget characteristics is modeled using LADAR equation, from which the system performances such as the pulse detection probability, false alarm and etc. are analyzed and predicted. The test results of the system performances are acquired and compared with the predicted system performance. According to test results, all the system requirements are satisfied. The 3D image which was acquired by using the laser radar system is also presented in this article.

Key Words : LADAR(레이저레이다), Laser Radar(레이저레이다), Time of Flight(비행 시간)

* Corresponding author, E-mail: jongpil.la@samsung.com
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

1. 서론

3차원 영상 레이저레이더(LADAR)는 레이저의 비행 시간(TOF : Time of Flight)을 측정하여, 3차원 영상을 생성한다. 레이저의 비행시간은 레이저 모듈에서 발사된 빛이 표적에 반사되어 검출기에 입사되는 데까지 소요되는 시간을 의미하며, 빛의 속도는 일정하므로, 비행시간에 의해서 표적까지의 거리를 측정할 수 있다.

표적의 한 지점의 거리를 측정하기 위해서는 한 개의 검출기가 반드시 필요하며, 2차원 배열 형태의 검출기를 이용해 동시에 여러 지점의 거리를 획득하는 방식으로 3차원 영상을 생성할 수 있다.

1차원 배열 검출기와 스캐너를 이용해서도 동일한 형태의 3차원 영상을 생성할 수 있으며, 단일 검출기와 2차원 평면 스캔이 가능한 스캐너를 이용하여, 3차원 영상을 생성할 수도 있다^[1].

검출기의 최적 형태는 레이저레이더 시스템의 요구 성능에 따라 달라질 수 있다. 별도의 스캐너가 없이 2차원 배열 검출기를 사용하는 경우, 단위 검출기에 픽셀 피치에 의해 3차원 영상의 공간 해상도가 제한될 수 있는 반면, 많은 검출기를 이용해 동시 검출이 가능하므로, 영상 해상도보다 영상의 속도가 중요한 경우 많이 이용된다. 반면, 영상의 속도보다 해상도가 더 중요할 경우에는 단일 검출기와 스캐너를 이용한 형태가 더 유리할 수 있다. 초점면 검출기 형 레이저레이더 시스템의 공간 해상도는 픽셀 피치와 광학계 해상도에 의해 고정되는 반면, 스캐너 형 레이저레이더 시스템에서는 고정밀 스캐너를 이용하여 고해상도 스캔이 가능하기 때문이다. 또한 일반적으로 단일 검출기 형태의 레이저레이더 시스템에 비해 초점면 검출기 형 레이저레이더 시스템에서는 단위 검출기의 신호처리를 위한 회로의 공간이 부족하기 때문에, 신호처리 과정이 단순할 수밖에 없으며, 이로 인해 거리 해상도도 상대적으로 낮은 편이다.

레이저레이더는 레이저 신호의 형태에 따라 연속 파형 방식, 펄스 방식, 랜덤 신호 방식으로 나뉘지만, 일반적으로 군사적 목적으로는 펄스 방식을 주로 사용하며, 본 논문에서도 펄스형 레이저 레이더 시스템에 대해서만 다루기로 한다^[2].

펄스형 3차원 영상 레이저레이더는 매우 짧은 레이저 펄스를 사용하므로, 거리 분해능이 매우 높은 3차원 영상을 얻을 수 있다. 레이저레이더의 거리 분해능은 비행시간 측정 분해능에 의해 결정되며, 공간 분해능은 광학적인 성능 즉 검출기의 IFOV 및 레이저의

발산각 등에 영향을 받는다.

일반적으로 3차원 영상 레이저레이더의 신호처리 과정은 2차원 영상에 비해 GHz 수준으로 매우 빠른 처리 속도가 요구되며, 처리 과정이 복잡하므로, 검출기 픽셀 개수에 제약이 많다. 따라서, 단위 시간당 영상 생성 속도는 2차원 영상에 비해 상대적으로 낮을 수밖에 없다. 그러나 2차원과 달리 3차원은 개개의 영상점들이 3차원 좌표값을 가지고 있으므로, 영상의 합성과 융합이 매우 쉬운 장점을 가진다.

장애물 탐지 등의 분야에서 3차원 영상은 2차원 영상에서 얻기 힘든 거리 정보를 가지고 있으므로, 장애물 탐지가 용이하다는 것은 자명하다.

3차원 영상의 또 다른 장점은 기 언급한 바와 같이 영상 합성이 빠르고 용이하다는 것인데, 수 초 전에 획득된 영상의 좌표를 저장하여, 현재 시점에서의 장애물을 탐지 및 충돌 가능성을 계산할 수 있다.

예를 들어, 헬리콥터가 착륙하는 경우, 착륙 전에 획득된 3차원 영상의 좌표를 저장하여, 현재 헬리콥터의 좌표와 수 초 전에 획득된 영상의 좌표를 비교하여 장애물에 대한 위험도를 평가할 수 있다. 이 경우, 장애물이 헬리콥터 뒤에 있어 현재 시점에서 센서가 감지가 불가능한 경우에도 충돌 가능성을 계산할 수 있으며, 사막과 같이 착륙 전에 심한 모래 바람이 발생할 수 있는 환경과 같이 센서 시야가 가려져서 더 이상의 측정이 불가능한 경우에도 헬리콥터 운용이 가능하다.

펄스 방식의 레이저레이더의 장점 중 하나는 매우 짧은 펄스를 사용함으로 동일 시선방향 내의 거리가 다른 두 표적을 구분할 수 있다는 것이다. 2차원 영상에서 특정 시각에 하나의 픽셀 내에 입사된 두 개 이상의 표적을 구분할 수 없는 것은 자명하다. 이는 연속 파형 방식이나 랜덤 방식의 레이저레이더의 경우에도 마찬가지인데, 다른 거리에서 반사된 레이저 신호가 합쳐져서 측정되므로, 두 물체를 구분할 수 없기 때문이다. 펄스형 레이저레이더 시스템에서는 두 개의 서로 다른 표적에서 입사되는 레이저 펄스가 시간적으로 구분되기 때문에, 각각에 대해서 거리를 측정할 수 있다. 펄스형 레이저레이더의 이러한 표적 구분 능력은 예를 들어 수풀이나 위장막 등에 의해 가려진 표적을 구분할 수 있게 하므로, 군사적 측면에서 매우 유용하다^[2].

본 논문에서는 펄스형 3차원 영상 레이저레이더 시스템의 설계와 성능 분석에 대해 기술하였다. 레이저레이더 시스템은 능동형 영상 시스템으로 사용된 레

이저, 광학계, 스캐너, 검출기 등의 성능 지표가 상호 밀접하게 연관되어 있으므로, 시스템 요구 성능으로부터 부시스템의 요구 성능을 도출하는 시스템 설계 과정이 매우 중요하다.

예를 들어, 레이저의 출력과 검출기의 민감도는 상호 보완의 관계에 있어, 검출기의 민감도가 높아지면, 레이저의 출력은 감소될 수 있다. 부시스템의 요구 성능 할당 과정에 있어, 부시스템 간의 균형을 유지하는 것이 매우 중요하며, 이 과정에서 부시스템 요구 규격의 마진 유지는 반드시 필요하다.

LADAR 방정식을 이용하여 레이저레이다 시스템의 레이저 전달 특성을 모델링하고, 계산된 레이저 전달 량으로부터 펄스검출 확률, 오류검출 확률 등의 주요 시스템 성능을 예측 분석하였다^[3]. 예측된 시스템 성능은 실험 결과와의 비교를 통해 검증 및 확인하였다.

2. 시스템 구성

본 논문에서는 표적 구분을 위해서 펄스형 레이저 레이더 시스템을 구성하였으며, 이를 위해 고출력의 펄스형 광섬유 레이저를 채택하였다. 일반적으로 광섬유 레이저는 고체 레이저나 기체 레이저에 비해, 단위 펄스당 에너지는 낮은 반면, 펄스 반복률은 높다. 따라서, 광섬유 레이저는 초점면 검출기 형태의 레이저 레이더 시스템보다는 단일 검출기 형태의 레이저레이다 시스템의 광원으로 적합하다.

검출기는 단일 검출기를 사용하고 있으며, 영상 획득 속도를 높이기 위해 7개의 채널을 가지는 1차원 배열 형태의 광섬유 다발과 긴 타원형태의 스캔 패턴을 가지는 리즐리 스캐너를 이용하여 3차원 영상을 생성하는 레이저레이다 시스템을 구성하였다. 각 채널 별로 시간 지연을 가지고 있는 7개의 광섬유 다발에서 나온 레이저 빔은 표적에 반사되어 7개의 수신 광섬유 다발로 입사되며, 광학계에 의해 단일 검출기로 입사된다. 각 채널은 시간 지연을 가지고 있으므로, 1개의 검출기를 사용하더라도 각각의 채널 별로 레이저 비행시간을 따로 측정 가능하다.

레이저의 비행시간은 각 채널별로 송광 광섬유에서 발사되는 시점부터 수신되는 시점까지 측정된다. 송광과 수광을 위해 동일한 광학계를 사용하므로, 송광 시점에도 송광 레이저의 일부가 검출기에 입사되는데, 이를 이용하여 비행시간의 측정 개시 시점을 측정한다.

검출기에 입사되는 레이저 펄스는 자체 개발된 고속 TIA를 통해 전압으로 변환되며, 고속 ADC를 이용하여 디지털 신호로 변환된다. 레이저 비행시간의 계산은 FPGA 기반의 고속 신호처리를 이용하여 계산한다. 신호처리를 통해 각 채널별로 입사된 펄스의 비행시간 및 펄스의 강도 신호를 얻는다. 표적의 거리와 펄스의 강도를 이용하여, 표적의 반사율을 알 수 있으므로, 강도 신호는 표적에 대한 중요한 정보를 제공한다.

항공기 이동 방향의 수직 방향으로 스캔하는 리즐

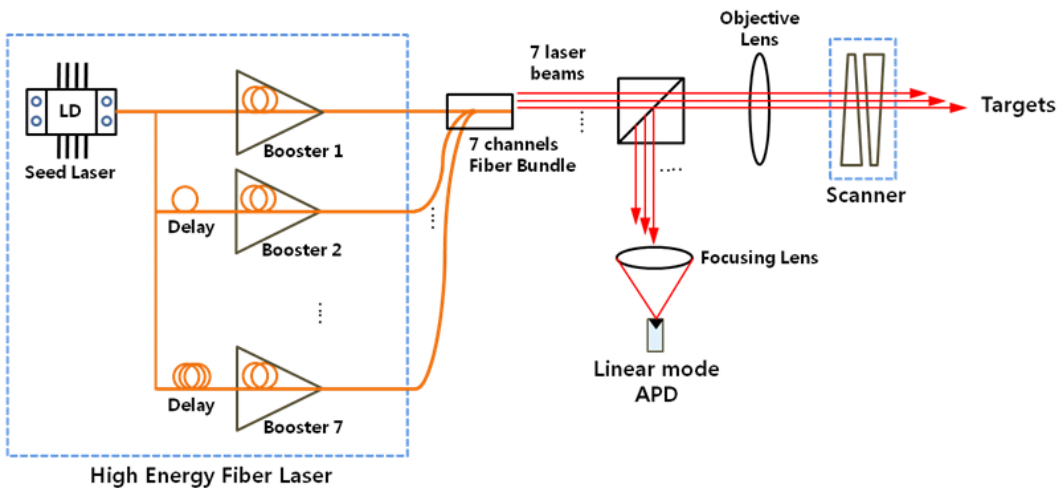


Fig. 1. The System Configuration of 3D Image Laser Radar

리 스캐너 외에, 추가로 항공기 자체의 속도에 의해 스캔이 되는 푸쉬 블룸 형태의 레이저레이더 시스템을 구성하였다.

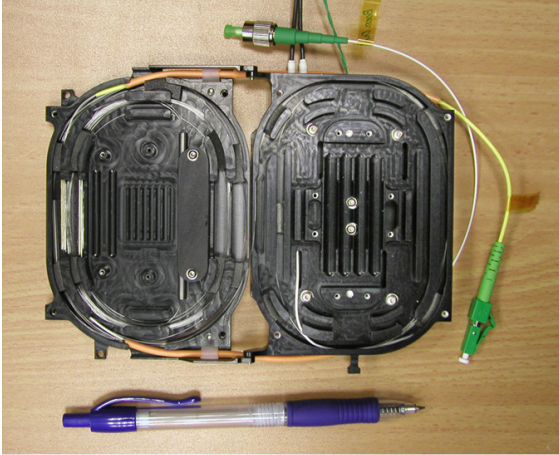


Fig. 2. The Manufactured Power Amplifier of Fiber Laser Transmitter Module

Fig. 2는 제안된 3차원 영상 레이저레이더 시스템에 사용된 광섬유 레이저의 파워 증폭기 모듈을 도시하고 있다. 광섬유 레이저는 레이저의 발생, 전달과 증폭이 모두 광섬유 내에서 이루어지므로 진동 및 충격에 의한 레이저 빔의 특성 변화가 적은 것이 큰 장점이다. 사용된 광섬유 레이저는 MOPA(Master Oscillator Power Amplifier) 구조를 가지고 있으며, Master Oscillator에서 ns 수준의 매우 짧은 레이저 펄스를 발생시키면, 파워 증폭기를 이용하여, 출력의 크기를 증폭하여 사용한다.

검출기는 고감도의 APD를 사용하고 있다. APD는 그 작동 특성에 따라 가이저 모드 APD와 리니어 모드 APD로 나뉘는데, 본 논문에서는 표적 구분 성능을 위해 리니어 모드 APD를 채택하였다.

Fig. 3은 검출기 모듈 내 고민감도의 선형 모드 InGaAs APD의 모습을 도시하고 있다. APD 검출기의 온도 변화에 따른 특성 변화를 최소화하기 위해 온도를 일정하게 유지하였다. 온도 제어는 모듈 내에 내장된 Thermistor와 TEC를 이용하여 제어된다. 검출기의 증폭률은 시스템의 신호 대 잡음비를 최적화 하 위해, 가변 가능한 구조로 설계되었다.

그 외 레이저 레이더 시스템은 전원공급모듈, 데이터 저장 모듈, 송수광광학계 및 각종 연산과 제어를 담당하는 로직 모듈로 구성되어 있다.

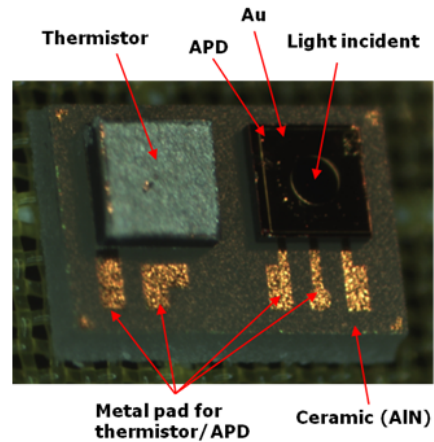


Fig. 3. The Magnified View of Linear Mode InGaAs APD Receiver

3. 시스템 성능 분석

펄스당 에너지 E_p 를 가지는 레이저 펄스가 표적에 반사되어 검출기에 입사되는 광량 E_r 은 LADAR 방정식을 사용하여 다음과 같이 얻을 수 있다^[3].

$$E_r = E_p T_L T_A^2 \left(\frac{IFOV}{\theta_T} \right)^2 \frac{\rho_T}{\Omega_T} \left(\frac{\pi D_A^2}{4R^2} \right) \quad (1)$$

여기서, T_L , T_A , D_A , R 은 각각 송수광광학계의 투과도, 대기투과도, 수광광학계의 유효 지름, 표적까지의 거리를 나타낸다. $IFOV$, θ_T , ρ_T , Ω_T 는 각각 순시 시야각, 레이저 발산각, 표적의 반사율, 표적의 입체 산란각을 나타낸다.

레이저레이더는 레이저 펄스 신호 외에 태양광에 의해 영향을 받는데, 태양광이 검출기에 입사되는 광량 E_{sr} 은 마찬가지로 방법으로 다음과 같이 구할 수 있다.

$$E_{sr} = E_\lambda \delta_\lambda \tau_g \pi \left(\frac{IFOV}{2} \right)^2 \left(\frac{\pi D_A^2}{4} \right) \left(T_A T_R \frac{\rho_T}{\Omega_T} \right) \quad (2)$$

여기서, E_λ , δ_λ , τ_g 는 각각 해당 파장에서의 태양복사 에너지, 파장밴드폭, 검출기의 검출시간을 의미한다. T_R 은 수광광학계의 투과도를 나타낸다.

식 (1)과 식 (2)에서 알 수 있듯이, 검출기에 입사되

는 레이저 광량은 레이저의 펄스당 에너지에 직접 비례하며, 수광광학계의 면적에 비례한다. 그러나, 레이저의 출력이 높아지고, 수광광학계의 면적이 커진다는 것은 시스템의 무게나 부피가 커진다는 것을 의미하므로, 적용에 한계를 가지고 있다.

레이저레이다 시스템의 성능 항목 중 광량과 가장 밀접하게 연관되는 항목은 펄스검출 확률과 오류검출 확률이다. 각종 시스템 설계 변수에 따른 펄스검출 확률과 오류검출확률을 얻음으로써 시스템 최적 설계를 진행하였다.

검출기의 검출 시간을 고려하지 않고, 항상 검출기가 검출한다고 가정했을 때 검출기의 오류 검출 확률 $P_{fa,full}$ 은 표준 확률 분포를 이용하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$P_{fa,full} = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_n^2}} \int_{i_{th}}^{\infty} \exp\left(-\frac{(i-i_n)^2}{2\sigma_n^2}\right) di \quad (3)$$

여기서, σ_n , i , i_n 및 i_{th} 는 각각 잡음의 표준편차, 검출기의 신호, 잡음의 평균값, 그리고 검출기 신호 임계값이다. 따라서, 시간당 오류발생빈도 FAR_{full} 은 검출기의 대역폭 B 를 적용하면 다음과 같다.

$$FAR_{full} = B \cdot P_{fa,full} \quad (4)$$

실제로 검출기는 검출 시간 동안만 측정하며, 그 이외의 시간은 외부 빛에 반응하지 않으므로, 검출 시간 τ_g 동안 검출 확률 $P_{fa,DOF}$ 는 포아송 확률 분포를 이용하여 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$P_{fa,DOF} = 1 - \exp(-FAR_{full} \cdot \tau_g) \quad (5)$$

레이저레이다의 펄스 반복률 PRR 을 고려한 오류발생확률 FAR_{DOF} 는 다음과 같다.

$$FAR_{DOF} = PRR \cdot N_{echo} \cdot P_{fa,DOF} \quad (6)$$

여기서, N_{echo} 는 레이저가 방출하는 하나의 레이저 펄스를 이용하여 시스템이 검출할 수 있는 펄스의 개수를 의미한다.

마찬가지 방법으로 펄스검출확률 $P_{pd,full}$ 은 표준 확

률 분포를 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_{pd,full} = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_s^2}} \int_{i_{th}}^{\infty} \exp\left(-\frac{(i-i_s)^2}{2\sigma_s^2}\right) di \quad (7)$$

여기서 σ_s 와 i_s 는 레이저 펄스 강도의 표준 편차와 평균 출력이다.

식 (6)과 식 (7)에서 시스템 최상위 성능 지표와 시스템 설계 변수들과의 관계를 도출하였으므로, 시스템의 목표 규격을 달성하기 위한 하위 시스템의 규격을 설정할 수 있다. 예를 들어 펄스 당 레이저 에너지 E_p 를 높이는 것과 검출기의 잡음 수준 σ_n 을 낮추는 것은 시스템 성능 중 하나인 펄스검출 확률에 동일한 효과를 미친다.

4. 실험 결과

펄스 검출 확률, 오류 검출 확률 및 표적 구분 성능을 측정함으로써, 주요 시스템 성능 변수에 대해서 설계값 및 성능 예측에 대한 정확도를 검증하였다. 시스템 성능 변수에 대한 정량적인 측정을 토대로 실제 3차원 영상을 획득하여, 정성적인 영상에 대한 질을 평가하였다.

시스템 주요 성능 변수에 대한 측정 전에 부시스템의 성능 변수, 예를 들어 레이저의 출력, 빔발산각, 검출기의 민감도 등은 부시스템 수준에서 측정을 완료하였으며, 요구 규격을 모두 만족함을 확인 하였다. 주요 구성품의 측정 결과와 시스템 성능 예측 결과를 바탕으로, 시스템 주요 성능 지표의 측정 결과를 비교 분석하였다.

펄스 검출 확률은 특정 반사율을 가지는 표적을 최소 측정 거리 및 최대 측정거리에 두어 측정 가능하다. 본 레이저레이다 시스템은 7개 채널의 레이저 빔을 표적에 조사하므로, 최대 측정 거리에서 7개 채널을 동시에 측정 가능한 표적을 사용하여야 한다. 그러나, 거리가 멀어짐에 따라 표적의 크기가 커지므로, 최소 측정 거리에서 적절한 표적을 사용하여 펄스 검출 확률을 측정하고, 최소 측정 거리에서 최대 측정 거리만큼 멀어질 때 해당하는 감쇄량, 다시 말해 소광비 만큼 광감쇄 필터를 적용하여 펄스 검출 확률을 측정함으로써 최대 측정거리에서의 펄스 검출 확률을

유추하였다.

펄스 검출 확률과 오류 검출 확률은 검출기 신호 임계값 i_{th} 에 의해 달라지므로, 고정된 i_{th} 값에 대하여 두 가지 성능 변수를 측정하여야 한다. 오류 검출 확률은 펄스 검출 확률 측정 시에 사용된 동일한 i_{th} 를 사용하여, 표적이 없는 영역에 레이저를 조사하여, 펄스가 검출되는지 확인하는 방식으로 측정하였다.

표적 구분 성능은 단일 검출기의 시야각 내에 거리가 다른 두개 이상의 레이저 펄스가 검출될 때 구분 가능한 최소 거리를 말한다. 일반적으로 표적 구분 성능은 검출기의 펄스 검출 후 회복 시간에 의해 결정되며, 회복 시간이 짧을수록 더 가까운 거리에 위치한 두개 이상의 표적을 구분할 수 있다.

Fig. 4는 레이저레이다의 측정 대상 지역의 실 사진과 획득된 3차원 영상을 보여 주고 있다. 도시된 3차원 영상은 사진에서 보는 각도와 동일한 위치와 각도에서 획득되었다. 3차원 영상은 비교를 위해 지붕의 모습이 잘 보이도록 회전 변환하였다. 그림의 붉은 원에서 보는 바와 같이 사진에서는 확인할 수 없는 건물 지붕 위의 상세 형상까지 비교적 자세하게 관찰할 수 있다.

Fig. 4는 3차원 좌표와 함께 레이저 강도 신호를 동시에 도시하였다. 즉 3차원 영상에서 밝은 부분은 반사율이 높은 영역임을 의미하고, 어두운 색깔은 반사율이 낮은 영역임을 의미한다.



Fig. 4. The 3D Image of the Test Site by the Laser Radar

본 3차원 영상은 해당 지역을 약 1분간 스캔하여 획득된 자료를 이용하여 구성하였다.

5. 결론

본 논문에서는 3차원 영상 레이저레이다 시스템의 시스템 설계, 주요 성능 변수에 대한 성능 예측 및 실험 결과에 대해서 기술하였다.

레이저레이다 시스템 설계를 위해 레이저의 전달 특성을 LADAR 방정식을 이용하여 모델링하였고, 이를 바탕으로 표준 확률 분포와 포아송 확률 분포를 이용하여 전체적인 시스템 성능을 예측하였다. 시스템 성능 예측 결과는 실험 결과와 비교 분석되었으며, 3차원 영상을 획득하여 정성적인 비교와 분석도 진행하였다.

제안된 레이저레이다 시스템은 단일 검출기를 사용하였음에도 7채널의 광섬유 다발과 고속 리즐리 스캐너를 사용하여, 초당 2백만 개의 3차원 점을 생성할 수 있으며, 매우 높은 해상도를 가지는 3차원 영상을 생성할 수 있음을 확인할 수 있었다.

개발된 레이저레이다 시스템은 펄스형 레이저를 사용하여 표적 구분 능력을 보유하고 있으며, 고해상도의 3차원 영상을 제공하므로, 향후 고해상도 3차원 지도 제작, 은폐 표적 탐지 응용, 3차원 변화 추적 등 감시 정찰 분야에서 다양하게 응용될 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] Robert Lange, "3D Time-of-Flight Distance Measurement with Custom Solid-State Image Sensor in CMOS/CCD Technology," Doctoral Dissertation, 2000.
- [2] M. A. Albota and B. F. Aull et. al., "Three-Dimensional Imaging Laser Radars with Geiger-Mode Avalanche Photodiode Arrays," Lincoln Lab. Journal, Vol. 13, No. 2, 2002.
- [3] A. V. Jelalian, "Laser Radar Systems," Artech House, Feb., 1992.