
Single-Shot LiDAR system을 이용한 Timing Jitter 분석 및 개선 방안

한문현* · 최규동** · 송민협** · 서홍석** · 민봉기* **

*과학기술연합대학원대학교,

**한국전자통신연구원

Timing Jitter Analysis and Improvement Method using Single-Shot LiDAR system

Mun-hyun Han* · Gyu-dong Choi** · Min-hyup Song** · Hong-seok Seo** · Bong-ki Mheen* **

*Korea University of Science and Technology (UST),

**Electronics and Telecommunications Research Institute (ETRI)

E-mail : {elec_cir, gdchoi, sminhyup, wisehss, bkmheen}@etri.re.kr

요 약

시간 정보를 이용하여 거리 측정 및 물체 탐지 등에 사용되고 있는 Time of Flight(ToF) LiDAR(Light Detection And Ranging) 기술이 자율 주행 자동차, 지형 분석 같이 보다 정밀 측정이 필요한 분야에 응용되면서 ToF 시간 정보 추출에 대한 중요성이 높아지고 있다. 본 논문에서는 ToF 시간 정보의 정확성의 지표로 timing jitter를 사용하였고, 약 31M free space 환경에서 1.5um 파장의 MOPA LASER와 InGaAs Avalanche Photodiode(APD)로 이루어진 Single-Shot LiDAR system(SSLs)을 통해 측정 및 분석하였다. 또한 SSLs를 통해 측정된 데이터에 curve fitting 방법인 spline interpolation과 반복 측정된 피크 데이터를 이용하는 multiple-shot averaging 방법을 적용하여 timing jitter 개선결과를 제시하였다.

ABSTRACT

Time of Flight(ToF) LiDAR(Light Detection And Ranging) technology has been used for distance measurement and object detection by measuring ToF time information. This technology has been evolved into higher precision measurement field such like autonomous driving car and terrain analysis since the retrieval of exact ToF time information is of prime importance. In this paper, as a accuracy indicator of the ToF time information, timing jitter was measured and analyzed through Single-Shot LiDAR system(SSLs) mainly consisting of 1.5um wavelength MOPA LASER, InGaAs Avalanche Photodiode(APD) at 31M free space environment. Additionally, we applied spline interpolation and multiple-shot averaging method on measured data through SSLs to improve ToF timing information.

키워드

LiDAR, ToF, Timing Jitter, Spline Interpolation, Multiple-shot Averaging

I. 서 론

송신한 레이저 신호가 물체에 반사되어 돌아오는 시간을 이용하는 Time of Flight(ToF) LiDAR

(Light Detection And Ranging)는 1930년대 구름 측정을 시작으로[1] 다양한 파장 및 펄스폭을 갖는 레이저의 특성을 이용하여 간단한 거리 측정부터 자율 주행 자동차, 지형 분석 같이 정밀 측

정이 필요한 분야까지 free space 환경의 다양한 분야에 응용되어 왔다[2]. 특히 정밀 측정 분야에 활용되는 ToF LiDAR는 정확한 정보 획득이 중요하기 때문에 다수의 pulse를 한 번에 내보내어 넓은 영역을 측정하는 multi-shot LiDAR보다[3] 높은 반복률을 갖는 single pulse를 통해 각 지점에 대한 정확한 정보를 추출하는 single-shot LiDAR가 적합하다[4].

따라서 본 논문에서는 정밀 측정에 적합한 LiDAR 시스템을 구성하고 측정된 데이터를 이용해 시간 정보 정확성을 나타내는 timing jitter를 분석 및 개선하는 방법에 대해 설명한다. 구성된 시스템은 ~2ns pulse width를 갖는 1.5um MOPA LASER와 해당 파장 흡수율이 뛰어난 InGaAs Avalanche Photodiode(APD)로 이루어진 ToF 방식의 Single-Shot LiDAR system(SSLs)으로 ~31M 실내 free space 환경에서 신호를 획득하고, 수신된 신호들의 시간에 대한 표준 편차를 활용한 timing jitter로 시간 정보의 정확성을 나타내었다. SSLs와 같은 ToF LiDAR에서는 timing jitter가 작을수록 시간축의 흔들림이 적어 정확한 물체 탐지에 유리하기 때문에 curve fitting 방법인 spline interpolation과 반복 측정을 적용하여 timing jitter를 개선하는 방법을 제안하였다.

II. 본 론

2.1 Single-Shot LiDAR system 측정 환경

SSLs는 한 개의 광원과 광 검출기를 활용한 LiDAR 시스템으로 전체 구성도는 그림 1과 같다. 송신부는 광원인 MOPA LASER를 포함하여, collimation lens, mirror와 pulse width, 레이저 power, 반복률 등 레이저의 특성을 조절하기 위한 PC 및 function generator를 활용하여 구성하였다. 특히 본 논문에서는 free space 환경에서 가장 중요한 시각 안전성을 높이기 위해 기존에 많이 사용되고 있는 905nm 파장이 아닌, eye-safety 특성을 갖는 1.5um MOPA LASER를 광원으로 사용하였다. MOPA LASER는 시각 안전 효과 뿐 아니라 ~2ns의 pulse width, 높은 반복률 특성을 가져 정밀 측정에 유리하다.

수신부는 광 검출기인 THORLABS APD 430C/M을 포함하여, 1" plano convex lens, lens tube, x-y translation mount 및 광 검출기에 수신된 신호를 확인하고 저장하기 위한 oscilloscope, PC로 구성하였다. 특히 광 검출기는 그림 2와 같이 실내 ~31M 거리에서 반사되는 ~2ns pulse width의 1.5um 파장 신호를 최대한 왜곡 없이 측정하기 위해 400MHz의 광대역 bandwidth와 InGaAs APD로 구성된 제품인 THORLABS APD 430C/M 사용하였다.

그림 2와 같이 측정된 신호는 APD와 연결된

oscilloscope로 확인할 수 있고, PC와도 USB로 통신으로 연결되어 LABVIEW를 이용해 측정된 데이터 추출이 가능하다. 이렇게 구성된 SSLs를 이용해 일정한 지점에 대한 single-shot 반복 측정을 통해 데이터를 추출하고, 추출된 데이터들의 시간 정보를 활용하여 timing jitter 분석을 진행하였다.

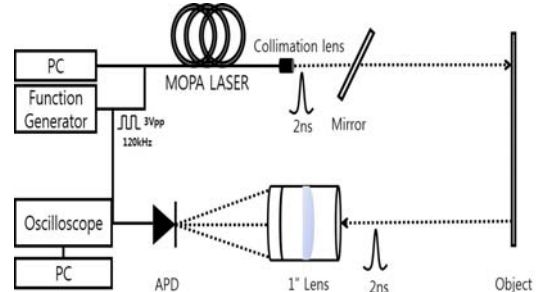


그림 1. Single-Shot LiDAR system 구성

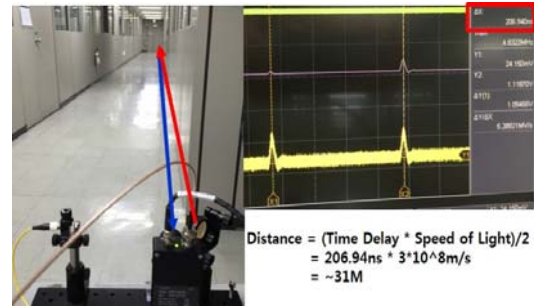


그림 2. Free Space Test

2.2 Timing Jitter 분석 및 개선 방법

본 논문에서는 시간 정보의 정확성을 나타내는 지표로 반복 측정된 수신 데이터들이 시간 축으로 흔들리는 정도(편차)를 나타내는 timing jitter를 활용하였다. Timing jitter는 식 (1)과 같이 반복 측정을 통해 추출된 데이터(x_i)와 전체 데이터들의 평균(M)을 통해 데이터들이 평균값에서 얼마나 떨어져 있는지를 나타내는 표준 편차(σ)를 활용하여 $\pm 1\sigma$ (1-sigma)로 나타낸다. 표준 편차가 작을수록 평균치에 근접한 데이터들이 많아 신뢰성 있는 데이터로 볼 수 있기 때문에 timing jitter가 작을수록 정확한 시간 정보를 통한 정밀 측정이 가능하다.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i^n (x_i - M)^2} \quad (1)$$

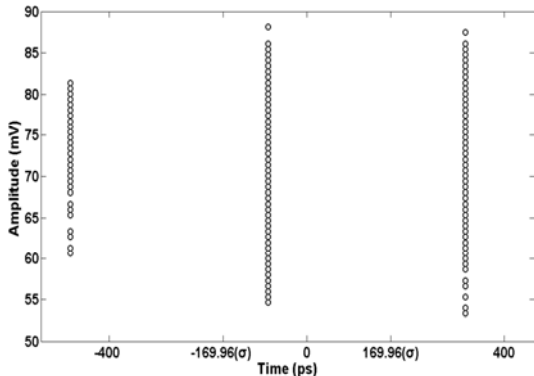
2.2.1 Spline Interpolation

SSLs를 통해 ~31M 거리에서 10,000번 반복 측정된 raw pulse의 peak는 정수 값만 추출하는 디지털 측정기기 oscilloscope 특성에 의해 그림 3과 같이 추출되었다. 그림 3 (A)에 보이는 peak분포

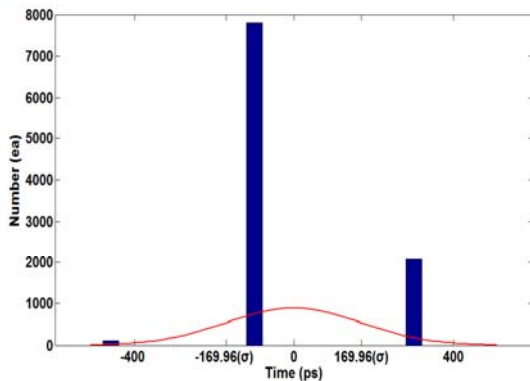
가 반복 측정 횟수(10,000번)와 비교했을 때 데이터 중복에 의해 차이가 나는 것을 히스토그램(B)을 통해 확인할 수 있고, 표본 개수가 많지 않아 timing jitter의 신뢰성 확보 또한 어렵다. 따라서 본 절에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 측정을 통해 얻은 raw pulse data를 기반으로 데이터 사이의 값을 유추할 수 있는 interpolation을 이용하였고, 이를 통해 정확한 peak값 유추와 timing jitter 개선 효과를 나타내었다.

다양한 interpolation 방법 중 본 논문에서 사용한 spline interpolation은 3차 다항식을 이용하여 점 사이를 근사시키는 방법으로, 양쪽 데이터의 함수값과 기울기를 이용하여 보다 부드럽고 정확한 데이터 추정이 가능하기 때문에 보간 방법 중 많이 사용된다[5]. 하지만 그만큼 계산이 복잡하고 어려워 정확한 계산을 위해 본 논문에서는 MATLAB의 interp1() 함수를 이용하였고, 각 pulse에 대해 정확한 peak 분포와 히스토그램을 추출한 결과를 그림 4를 통해 확인할 수 있다.

그림 3, 4는 spline interpolation 전, 후의 peak 분포 차이를 뚜렷하게 나타내고 있으며, timing jitter를 나타내는 x축의 σ 값 또한 $\pm 169.96\text{ps}$ 에서 $\pm 136.76\text{ps}$ 로 $\sim \pm 33\text{ps}$ 개선되는 것을 확인할 수 있다. 즉, spline interpolation 이전보다 정확한 데이터 추출과 높은 시간 분해능을 통한 정밀 측정이 가능할 것으로 예측된다.

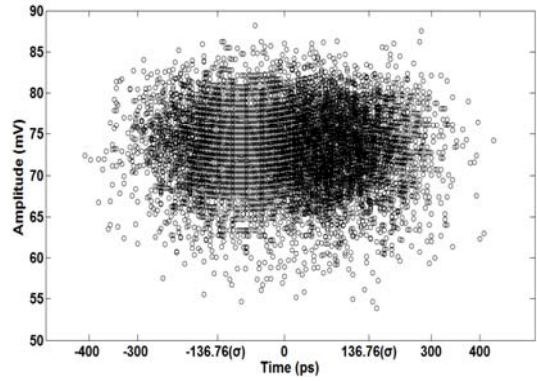


(A) Peak distribution

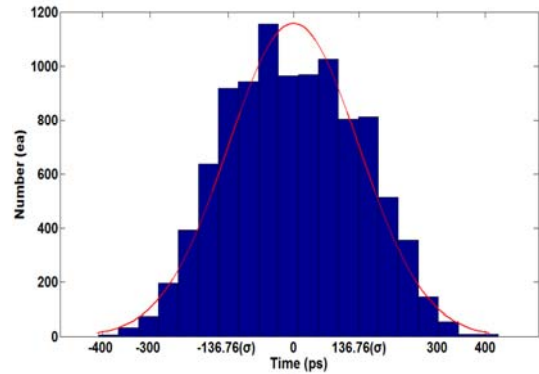


(B) Histogram

그림 3. Before spline interpolation



(A) Peak distribution



(B) Histogram

그림 4. After spline interpolation

2.2.2 Multiple-Shot Averaging

본 절에서는 그림 4와 같이 spline interpolation으로 개선된 신호를 이용해 정밀 측정 방법 중 하나인 multiple-shot averaging이 timing jitter에 끼치는 영향에 대한 분석을 진행하였다. Multiple-shot averaging은 표준 편차를 활용하는 noise 감소를 위해 일정 개수(N)개의 pulse를 묶어 평균을 취하고, N값이 변화면서 표준 편차 또한 \sqrt{N} 에 비례하여 감소하는 특징을 이용한 방법으로[6,7], 본 논문에서는 이 방법을 적용하여 표준 편차를 활용한 timing jitter가 pulse averaging 개수(N) 증가에 따라 \sqrt{N} 에 비례하여 개선되는지 확인하였다.

Multiple-shot averaging이 timing jitter 개선에 효과가 있는지 확인하기 위해 2.2.1절에서 얻은 데이터로 multiple-shot averaging 전, 후를 비교하였다. 그림 4와 같이 $\pm 136.76\text{ps}$ 의 σ 를 갖는 single-shot data를 10개의 pulse씩 묶어(N=10) multiple-shot averaging 한 결과, 그림 5와 같이 σ 가 $\pm 45.52\text{ps}$ 로 $\sim \pm 91.24\text{ps}$ 개선되는 것을 확인하였다. 이 결과는 \sqrt{N} 에 의해 계산된 이론값인 $\pm 43.25\text{ps}$ 과 비교해도 5% 이내의 오차를 보인다.

위 실험을 통해 multiple-shot averaging이 timing jitter를 개선하는데 효과가 있음을 확인하

였으나, N 값이 다양하게 변화함에 따라 timing jitter가 \sqrt{N} 에 비례하여 개선되는지 확인이 필요하다. 따라서 N 값을 1, 2, 5, 10, 20, 25, 50으로 변화하였고, 이에 대한 결과를 그림 6에 나타내었다. \sqrt{N} 에 비례하여 감소하는 이론값을 비교 값으로 넣었고, \sqrt{N} 으로 감소되는 현상을 한눈에 알아보기 위해 log-log 그래프를 이용하였다.

그림 6에서 보면 측정을 통해 얻은 데이터를 이용하면 최초 $\pm 136.76\text{ps}$ 의 σ 가 최대 $\pm 24.4\text{ps}$ 까지 $\sim \pm 112.36\text{ps}$ 개선되었고, pulse averaging number(N)가 증가함에 따라 timing jitter가 개선되는 것을 확인하였다. 하지만 N=20 이후에는 \sqrt{N} 에 비례하는 이론값과 차이가 나타나며 N=50에서 이론값과 차이($\pm 5\text{ps}$)를 나타내는 것을 확인하였다.

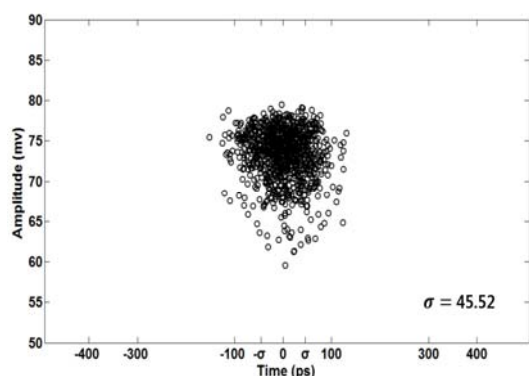


그림 5. Multiple-shot averaging (N=10)

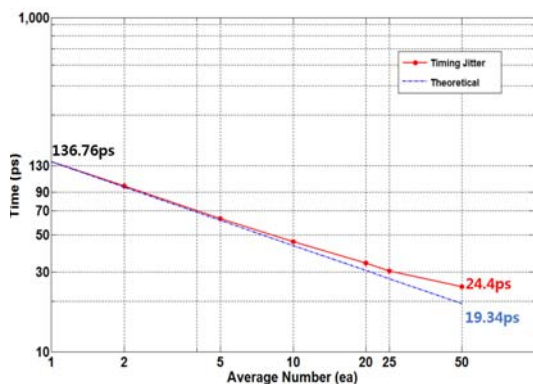


그림 6. Averaging number VS Timing jitter

III. 결 론

본 논문에서는 ToF 방식의 Single-shot LiDAR system(SSLs)를 구성하여 실내 $\sim 31\text{M}$ 거리 free space에서 반사되는 신호를 수신하고, SSLs에 수신된 신호를 통한 정밀 측정을 위해 spline interpolation, multiple-shot averaging을 이용하여 시간 정보의 표준 편차인 timing jitter를 분석 및 개선하였다.

SSLs를 통해 추출된 pulse peak값은 디지털 기

기인 오실로스코프를 통해 추출되어 정확한 peak를 추출하기 힘들어 spline interpolation을 활용하여 정확한 peak값을 유추하고, timing jitter 또한 $\pm 169.96\text{ps}$ 에서 $\pm 136.76\text{ps}$ 로 $\sim \pm 33\text{ps}$ (~ 1.24 배) 개선되었다. 정밀 측정을 위한 timing jitter 개선 방법인 multiple-shot averaging이 반복 개수가 많아지면서 timing jitter 또한 감소되는 특성을 이용하여 single-shot일 때 $\pm 136.76\text{ps}$ 에서 N=50일 때 최대 $\pm 24.4\text{ps}$ 까지 ~ 5.6 배 timing jitter를 개선하였다. 시간 정보를 이용하여 거리 측정이 가능한 ToF LiDAR system에서는 분석된 timing jitter를 이용해 거리 분해능을 나타내는데 활용할 수 있고, multiple-shot averaging에서 N=20이후에 이론값과 차이가 나타나는 이유는 그림 2와 같이 실내 복도 문에서 반사되는 데이터를 활용하여 옆 문의 열고 닫힘에 의한 진동에 대한 영향이 표본 수가 줄어들면서 반영되어 나타나는 것으로 예상된다. 이를 해결하지 위해 주변 영향이 없는 물체로 측정하여 문제점 확인 및 개선이 필요하며, 실제 LiDAR 시스템은 실외 활용이 많기 때문에 다양한 환경(실외 주, 야간 측정 등)에서 SSLs를 통한 측정과 개선 방법을 적용한 timing jitter에 대한 분석이 필요하다.

참고문헌

- [1] C.Weikamp, Lidar:Range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere, Springer, 2005.
- [2] Lidar, <https://en.wikipedia.org/wiki/Lidar>, retrieved May 5th, 2016
- [3] Long range detection of line-array multi-pulsed coding lidar by combining the Accumulation coherence and Subpixel-energy detection method, Jinshan S, Yuanqing W, Dongdong L, OPTICS EXPRESS, Vol. 23, No. 12, 3-4pp, 2015
- [4] A High Repetition Rate CMOS Driver for High-Energy Sub-ns Laser Pulse Generation in SPAD-Based Time-of-Flight Range Finding, Jan Nissinen, Juha Kostamovaara, IEEE SENSORS JOURNAL, VOL. 16, NO. 6, 2016
- [5] spline interpolation, qt3b1s62da6s.tistory.com/416, retrieved Jun 7th 2016
- [6] John R. Marciante, Averaging of Replicated Pulses for Enhanced Dynamic-Range Single-Shot Measurement of Nanosecond Optical Pulses, IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, VOL. 19, NO. 18, 1-3pp, 2007
- [7] Martin J. T. Milton and Peter T. Woods, Pulse averaging methods for a laser remote monitoring system using atmospheric backscatter, APPLIED OPTICS, Vol. 26, No. 13, 1987