

위상천이 방법을 이용한 고분해능 레이저 거리측정 시스템 개발

Implementation of High-Resolution Laser Distance Measurement System using Phase-Shift Method

박병제*, 이충우**, 정정주***, 소재혁†, 웅상진†
한양대학교 전자통신전파공학과* **
한양대학교 전자전기컴퓨터공학부***
(주)EO Technics 기술연구소 H/W 연구그룹†

Bee Jay Park*, Chung Woo Lee**, Chung Choo Chung***, Jae Hyuk Sho†, Sang Jin Ong†

Abstract - In this paper, we developed a laser distance measurement(LDM) system based on DSP. We applied PPD(Pulsed Phase Detection) algorithm to the LDM system. The PPD algorithm calculate the distance from the LDM system to the object by using phase detection. Reference waveform at a fixed frequency is sampled by both the inner-loop and outer-loop pulse signal. The LDM system detects the difference of phase between the sampled signals. We obtained an accuracy of $\sigma=25.5\text{mm}$ from the LDM system.

Key Words : distance measurement, rangefinder, laser application, phase-shift, jitter

1. 서론

거리측정 시스템의 주된 응용분야는 거리측정 분야를 비롯하여 자율로봇제어, 자동차의 전/후방 장애물탐지, 선박 접안용 제어장치, 토목공사 측량장치에 이르기까지 연구 분야와 실제 산업분야에서 널리 사용되고 있다[1][9]. 비 접촉식 거리측정 시스템의 기본적인 원리는 무선, 초음파, 또는 광학원 등의 소스를 거리측정 목표물을 향해 조사하고 되돌아온 파형을 신호 처리함으로써 측정하는 방식이다. 이러한 시스템은 사용되는 소스에 따라 크게 초음파를 이용한 시스템과 레이저를 이용한 시스템으로 구분할 수 있다.

초음파를 이용한 거리측정 시스템은 Teshigawara 등에 의해 연구되었으며 0.2mm 분해능과 2msec의 응답속도를 가진 거리측정 시스템이 구현되었다[4]. 그러나 무선이나 초음파를 이용한 거리계는 초점을 정확하게 맞출 수 없기 때문에 고분해능을 가지는 거리측정 시스템을 만들기 위해서는 레이저와 같은 광학원을 사용하여야 한다[1].

Kilpela는 1 GHz APD(Avalanche Photo Diode)를 이용한 TOF(Time-of-Flight) 방식의 레이저 거리측정 시스템을 구현하였다[3]. TOF 방식은 레이저 펄스를 측정대상에 조사고, 측정대상으로부터 되돌아온 펄스는 APD를 통해 수광된다. 수광된 레이저 펄스간의 시간차를 계산함으로써 거리를 구할 수 있다[3][6]. 그러나 이 방식의 시스템을 구현하기 위해서는

APD를 비롯한 GHz대 소자들을 이용하여 시스템을 설계해야 하는 어려움이 있다.

고속 소자를 사용해야하는 TOF 방식의 설계상 단점을 보완할 수 있는 방법으로 위상천이(Phase-shift Method) 방법이 있다. 위상천이 방법을 이용한 레이저 거리측정 시스템은 Poujouly 등에 의해 제안되었다[2]. 이 방식은 레이저를 일정 주파수의 sine 파로 변조하여 측정대상에 조사한다. 되돌아온 신호는 위상천이 되어 있으며, 이 신호를 복조 과정을 통해 새로운 두 가지 신호를 만들어 이를 이용하여 거리를 측정한다. 이 외에도 Dupuy 등은 위상천이 방법을 이용하여 변조과정의 종류와 APD 설계방법에 따른 시스템의 성능에 대한 연구를 하는 등 다양한 연구들이 이루어졌다[5].

본 논문에서는 레이저 거리측정 시스템에 PPD(Pulsed Phase Detect) 방법을 적용하였다. PPD 알고리즘은 15MHz의 기준주파수를 저주파의 레이저 펄스신호로 under-sampling 한다. 이 과정을 통해 시스템 내부에서는 inner-loop 신호를 만들고, 되돌아온 펄스신호를 이용하여 outer-loop 신호를 생성한다. 두 신호의 위상차를 검출함으로써 거리를 측정할 수 있다. 본문에서는 PPD 알고리즘과 거리계산 과정에 대하여 설명하고, 모의실험과 시스템 구현을 통한 실험결과를 보인다.

2. 레이저 거리측정 알고리즘

본 연구에 적용된 거리계산 알고리즘은 under-sampling 된 외부광로와 내부광로 신호 사이의 phase-shift를 검출하여 측정대상물까지의 거리를 계산한다.

저자 소개

- * 學生會員: 漢陽大學 電子通信電波工學科 碩士課程
- ** 學生會員: 漢陽大學 電子通信電波工學科 博士課程
- *** 正會員: 漢陽大學 電子電氣컴퓨터工學部 副教授
- † 正會員: (株)EO Technics 技術研究所 H/W그룹

2.1 Under-sampling Method

Nyquist sampling theory에 의해 주파수 f 인 파형을 $f_s < 2f$ 인 f_s 로 sampling하게 되면 aliasing 현상이 일어난다. PPD 알고리즘에서 거리계산은 under-sampling 후 나타나는 aliasing에 의해 만들어진 주파수를 이용한다. 기준 주파수인 15MHz의 sine-wave f 에 대하여 저주파 신호인 3030Hz의 펄스 주파수 f_s 로 under-sampling 함으로써 30Hz의 sampling 파형 f_D 가 만들어진다. f_D 파형 1주기는 펄스주파수 f_s 의 101번째 주기와 동일하게 되며, sampling data들은 순차적으로 메모리 어드레스에 저장한다. 그림 2는 이러한 과정을 나타낸다[7].

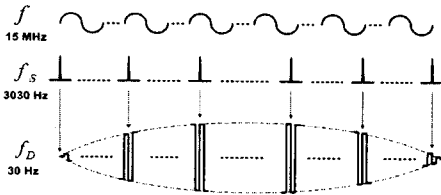


그림 1 기준주파수의 Under-sampling

2.2 Phase-shift Measurement

광속 $c = 3 \times 10^8$ m/sec 라 할 때, λ 는 식 (1)에 의해 구할 수 있으며, 30Hz f_D 의 한 주기는 10m의 거리에 해당한다.

$$f = \frac{\lambda}{2c} \quad (1)$$

PPD방식의 LDM system에서는 두 종류의 sampling data를 서로 다른 메모리에 저장한다. 하나는 시스템 내부에서 기준 주파수를 under-sampling한 data (inner-loop data)이고, 또 다른 하나는 거리측정대상에 반사되어 돌아온 f_D 로 기준 주파수를 sampling한 data (outer-loop data)이다. 각 메모리에 순차적으로 저장된 sampling data들은 다시 정현파로 복원시킬 수 있다. 또한 inner-loop와 outer-loop의 sampling data는 각각 odd number data와 even number data로 나누어 위상차 계산에 사용된다. Inner-loop data를 D_0 라 하면 위상차는 식 (2)에 의해 구할 수 있으며, 그림 2는 inner-loop와 outer-loop의 위상차를 보여주고 있다.

$$\begin{aligned} a_0 &= \sum_{i=1}^n D_0(i) \times \sin\left(2\pi \times \frac{i}{n}\right) \\ b_0 &= \sum_{i=1}^n D_0(i) \times \cos\left(2\pi \times \frac{i}{n}\right) \\ \theta_0 &= \tan^{-1}\left(\frac{b_0}{a_0}\right) \end{aligned} \quad (2)$$

동일한 방법으로 outer-loop data를 얻어 θ_1 을 계산함으로써 측정대상까지의 거리 d 를 식 (3)에 의해 구할 수 있다.

$$d = \frac{1}{2} \left[(\theta_0 - \theta_1) \times \frac{1}{2\pi} \times \frac{c}{f} \right] \quad (3)$$

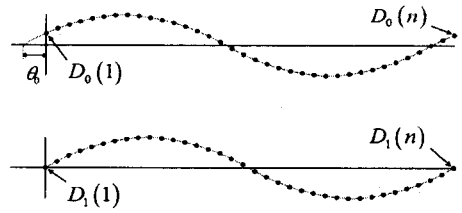


그림 2. Inner-loop와 outer-loop 위상차

3. 레이저 거리측정 시스템 구현

본 연구에서 구현한 레이저 거리측정 시스템의 구성도는 그림 3과 같다. 기준 주파수 f 와 sampling 펄스 주파수 f_s 는 주파수의 안정도를 유지하기 위하여 TCXO(Temperature Compensated Crystal Oscillator)를 사용하였다.

	vs. temp.	vs. supply voltage
stability	± 1.5 ppm	± 0.3 ppm

표 1. TCXO stability vs temp. & supply voltage

거리측정 시스템에서 가장 핵심 부분인 거리에 대한 모든 연산은 Texas Instrument사의 DSP인 TMS320VC33을 사용하였다. DSP의 모든 연산은 내부 메모리를 사용함으로써 외부 메모리 사용에 따른 지연시간이 DSP 연산 프로세스에 영향을 미치지 않도록 하였다.

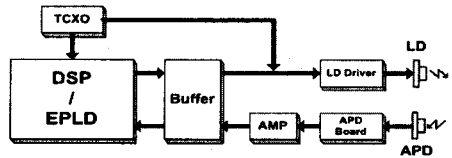


그림 3. LDM system block diagram

4. 모의실험 및 실험결과

Matlab Simulink™를 이용하여 모의실험을 구성하였다. 레이저 거리측정 시스템에서 측정거리에 영향을 미치는 요소에는 회로 noise 그리고 광학계(LD/APD)와 회로부에서 발생하는 jitter 등이 있다. 실제 거리측정 실험 후 결과를 얻고 모의실험을 통하여 검증하였다.

4.1 Noise를 반영한 모의실험

Noise를 반영한 모의실험에서는 전원 noise, 기준주파수의 harmonics, 회로의 고주파 성분 그리고 고주파 random noise 등이 반영하였다. 거리 3.5000m에서의 모의실험 결과는 3.5031m로 noise를 반영하지 않은 모의실험 결과와 차이를 보이지 않았다. 실험에 반영된 회로적인 noise는 거리측정에 큰 영향을 주지 않음을 알 수 있다.

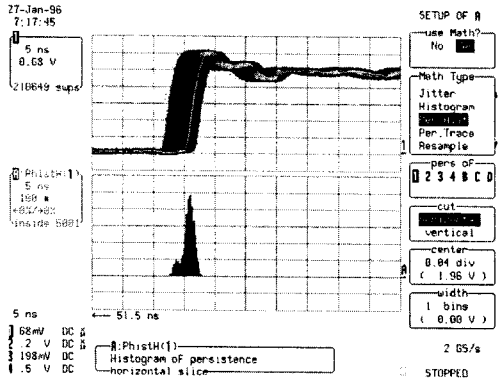


그림 4. outer-loop 펄스신호의 jitter histogram

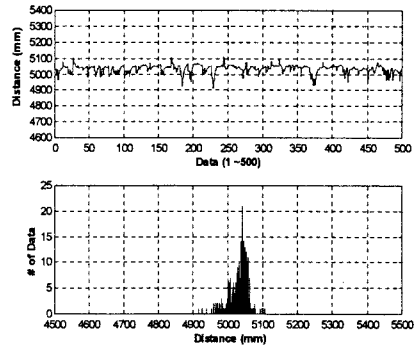


그림 6. Distance data histogram (5m)

4.2 Jitter 측정 및 Jitter를 반영한 모의실험

실제 구현된 레이저 거리측정 시스템에서 outer-loop의 위상 계산은, APD에서 수광되어 증폭단과 buffer를 거친 펄스 신호를 이용한다. 그러므로 거리계산에 영향을 미치는 jitter 정도를 보기 위하여 buffer에서 출력되는 신호의 jitter를 측정하였다. 측정 장비는 LeCroy사의 LC684DXL 1.5 GHz DSO를 사용하였다. 그림 4에서와 같이 측정 jitter는 6nsec로 측정되었으며 이는 거리측정 오차에 큰 영향을 미치고 있음을 확인하였다.

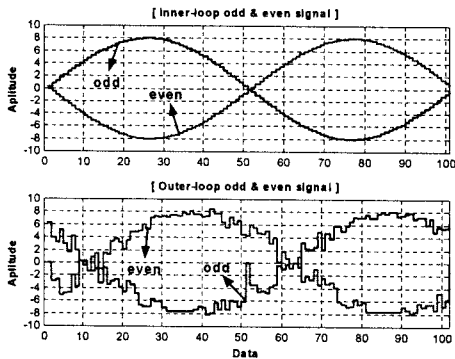


그림 5. Jitter를 적용한 모의실험 결과

본 연구에 적용된 알고리즘은 위상차를 이용하여 거리를 계산하므로 jitter는 시스템의 accuracy에 직접적인 영향을 미치는 요소이다. Jitter 측정실험 결과로부터 jitter 성분이 거리측정에 미치는 영향을 모의실험을 통하여 검증하였다.

그림 5는 6nsec의 jitter를 반영한 모의실험 결과이다. Outer-loop 신호의 전체적인 sine-wave 형태는 잃지 않았으나 jitter에 의해 왜곡된 현상을 보였다. 3.5000m 거리측정 모의실험에서 23.0mm의 측정 오차를 보였다.

그림 6은 본 연구에서 구현한 레이저 거리측정 시스템을 이용하여 5m 거리에 위치한 측정대상에 대한 거리측정실험 결과이며, 500개의 거리 data와 distance histogram이다. 측정 실험결과 mean = 5.0331m, standard deviation σ = 25.5mm의 결과를 얻었다.

5. 결론

본 논문에서는 위상차가 현상을 검출하여 거리를 계산하는 알고리즘을 적용한 DSP 기반의 레이저 거리측정 시스템을 구현하였다. 구현된 시스템에는 Inner-loop와 outer-loop의 위상차에 의해 거리를 측정하는 PPD 알고리즘을 적용하였다. 시스템의 회로 noise 모델을 적용한 거리측정 모의실험을 실시하였고, 실제 구현된 시스템을 이용한 거리측정을 하였다. 거리측정 시 시스템의 accuracy에 큰 영향을 미치는 요소인 jitter 성분을 측정하고, jitter가 accuracy에 미치는 영향을 모의실험을 통하여 검증하였다. 레이저 거리측정 시스템 구현에 있어 시스템의 accuracy 향상을 위해서는 jitter에 둔감한 거리측정 알고리즘과 jitter를 고려한 회로 및 광학계 설계가 필요하다.

참고 문헌

- [1] T. Bosch, M. Lescure, "Laser Distance Measurements," SPIE ed., Washington, Milestone Series, Vol. MS 115, 1995.
- [2] S. Poujouly, B. Journet and D. Placko, "Digital Laser Range Finder: Phase-Shift Estimation by Undersampling Technique," IEEE, pp. 1312-1317, 1999.
- [3] A. Kilpela, R. Pennala and J. Kostamovaara, "Precise pulsed time-of-flight laser range finder for industrial distance measurements," Review of Scientific Instruments, Vol. 72, No. 4, pp. 2197-2202, April 2001.
- [4] M. Teshigawara, F. Shibata and H. Teramoto, "High Resolution (0.2 mm) and Fast Response (2 ms) Range Finder for Industrial Use in Air," IEEE 1989 Ultrasonics Symposium, pp. 639-642. 1989.
- [5] D. Dupuy, M. Lascure and M. Cousineau, "A FMCW Laser Range-Finder Based on a Delay Line Technique," IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, pp. 1084-1088, May 2001.
- [6] H. J. Kim, H. G. Jun, D. H. Kim, S. H. Lee and K. S. Choi, "A Study on The Development of A Distance Measuring Instrument Using Laser," 한국신호처리 시스템학회, 하계학술대회 논문집 2권 1호, pp. 85-88, 2001.
- [7] M. Ohishi, "Light Wave Rangefinder," US Patent, US 6,433,860B, Aug 2002.