

회절 격자를 이용한 레이저 엔코더의 광 신호처리

김수진*, 은재정, 최평석

창원대학교 전자공학과

전화: (055) 289-9872 / 팩스: (055) 281-5070

Optical Signal Processing of Laser Encoder Using Diffraction Grating

Su-Jin Kim*, Jae-jung Eun, Pyung-suk Choi

Dept. of Electronics Engineering, Nat'l Changwon University

sujinkim@cosmos.changwon.ac.kr

Abstract

Position-determining capacity is a very important condition in equipments for manufacturing semi-conductor or various instruments to measure physical displacement quantities of a moving object in submicron such as a distance of movement, direction, etc. and the accuracy of total system is influenced by detecting accuracy of these equipments. Therefore in this paper we have optically made up laser linear encoder based on optical diffraction principle to measure these displacement quantities and have processed optical signal using hardware-setup.

In consequence we had acquired displacement for movement of scale using a diffraction grating by the accuracy of $0.5\mu\text{m}$ and had digitalized moving quantities of scale.

I. 서론

산업용 머신 툴, 산업 로봇, 고정밀 장치 등에서 미소 단위로 이동하는 물체의 이동량이나 이동 방향과 같은 물리적 변위(displacement)량을 측정하는 다양한 계측기나 리소그래피(lithograph)와 같은 반도체 제조 장치 등에서의 위치 결정 능력은 수많은 시스템에서 중요한 요건이며, 이러한 기기들의 변위 검출에 대한 정확도는

장치의 성능을 좌우하게 된다¹. 그러므로 이러한 변위를 고 정밀도로 측정할 수 있는 센싱 디바이스가 요구되며, 여기에는 일반적으로 높은 정확도를 요구하는 변위량의 검출을 위해서는 레이저 간섭계(Laser Interferometer) 또는 레이저 엔코더 즉, 광학 엔코더(Optical Encoder)가 이용될 수 있다.

일반적으로 아주 높은 정확도를 요구하는 변위량을 검출하기 위해 특정한 파장을 기준으로 하는 레이저 간섭계가 이용되어진다. 그러나 이것을 이용하는 변위 측정은 $0.1\mu\text{m}$ 이상의 정확도로 변위 측정이 가능하지만¹¹, 주위 환경에 아주 민감하고 측정 절차가 복잡하며, 그 결과 대규모이며, 고가이다. 이에 반해 회절 격자와 같은 스케일의 간격을 기준으로 하는 광학 엔코더는 레이저 간섭계에 비해서 정확도가 다소 떨어지거나 그에 준하는 정확도를 가지지만, 주위 환경에 크게 영향을 받지 않을 뿐 아니라 측정 장치가 소형이며 저가이다. 또한 회절 격자와 같은 스케일의 간격을 조절하여 분해능을 향상시킬 수 있으며, 디지털 시스템과의 인터페이스가 용이하다.

위와 같은 이유로 측정기의 디지털화나 산업 기계 등의 위치 검출에 광학 엔코더가 이용되어진다. 광학 엔코더는 기계 장치의 직선 운동하거나 회전 운동하는 부분의 변위나 속도를 검출하기 위해 사용하는 일종의 A/D 변환기로, 특히 A/D 변환 매체로 각종의 부호화 패턴을 갖는 직선 또는 원판형 스케일을 갖는다¹².

본 논문에서는 여러 광학 엔코더 중 발생된 정

보, 즉 광학계 내에서 발생하는 엔코더 신호에 의해 분류될 수 있는 인크리멘탈 엔코더(incremental encoder)에서 회절 격자에 기본하는 스케일을 이용하여 고 분해능을 얻을 수 있는 레이저 간섭계형 광학계를 구성하였으며, 또한 광학계 내에서 발생된 아날로그 신호를 하드웨어적인 성분들을 사용하여 디지털화하였다. 그리고 회절 격자에 기본한 스케일을 이동 시켰을 때 얻어진 신호를 이용하여 스케일의 이동 정보를 얻어내고, 그 신호의 신뢰성을 분석하였다.

II. 이 론

레이저 엔코더 즉, 광학 엔코더는 동일한 간격의 회절 격자를 갖는 스케일을 사용하고 그 이동량에 비례하는 출력 펄스를 카운트하여 위치나 이동량을 알아낸다. 이 엔코더는 직교위상(quadrature) 신호를 사용하며, 아날로그 및 디지털 형태의 신호를 모두 출력한다^[4].

레이저 엔코더에 사용되는 회절 격자는 일반적으로 홀로그램(hologram)을 이용하여 제작된다. 특히 $2\Lambda \sin \theta = n\lambda$ (여기서 Λ 는 회절 격자의 간격(주기), n 은 회절 차수, λ 는 입사 광의 파장이다.)으로 주어지는 브래그 조건(Bragg condition)을 만족하는 광학 배열이 이루어진 경우, 높은 출력과 고 분해능의 신호를 얻을 수 있다.

그림 1은 회절광 중 ± 1 차 회절광만을 취한 레이저 엔코더의 기본 구성을 나타낸 것이다. 그리고 회절 격자에 의해 회절되는 방향은 다음과 같은 격자 방정식으로 주어진다^[3].

$$\sin \theta_n = n\lambda/P \quad (1)$$

여기서 n 은 양의 정수 또는 음의 정수를 갖는 회절 차수($n = \pm 1, \pm 2, \dots$)이고, λ 는 광 파장, 그리고 P 는 회절 격자의 피치(pitch), 즉 주기이다.

광파의 위상 변화($\phi = \vec{k} \cdot \vec{r}$)는 광의 전파 상수 \vec{k} 와 방향 벡터 \vec{r} 로써 나타낼 수 있다. 그러므로 그림 1에서 화살표 방향으로 회절 격자가 X 만큼 이동한다고 가정하면, 이때 $+n$ 차 회절광의 위상 천이는 $+2\pi nX/P$ 이며, $-n$ 차 회절광의 위상 천이는 $-2\pi nX/P$ 가 된다. 이러한 $+n$ 차 회절광과 $-n$ 차 회절광은 빔 스플리터(beam splitter) BS에 의해 합쳐지고 상대적인 위상에 의존하여 보강

간섭하거나 상쇄 간섭이 일어나게 된다. 그러므로 피치가 P 인 회절 격자에 의해 회절된 광에 대한 광 검출기(photo-detector)에서의 간섭 강도(intensity)의 변화에 의한 위상 변화는 회절 격자의 이동량 X 와 관련된 다음 식으로 주어진다^[3].

$$\phi = \frac{4\pi nX}{P} \quad (2)$$

위 식에서 알 수 있듯이, 양의 n 차 회절광($n=+1$)과 음의 n 차 회절광($n=-1$)이 빔 스플리터 BS에 의해 중첩되어 간섭을 일으키고, 회절 격자가 한 피치 이동하는 동안 4π 의 위상 변위가 발생하게 됨을 알 수 있다. 결과적으로 간섭에 의해 발생하는 두 주기의 밝고 어두운 신호의 변화를 검출하면 회절 격자의 이동량을 알 수 있게 된다. 이 때 나타나는 광 신호의 변화는 다음과 같다.

$$I_A = I_0[1 + a \cos(\phi)] \quad (3)$$

$$I_B = I_0[1 - a \cos(\phi)]$$

여기서 I_0 는 평균 강도이고, a 는 진폭이며, 두 빔의 위상차 $\phi = 4\pi nX/P$ 이다.

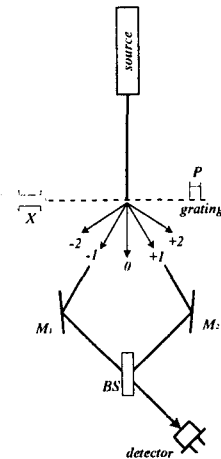


그림 1. 레이저 엔코더의 기본 구성

III. 실험 구성

본 논문에서는 선형적인 변위 측정을 위한 인크리멘탈형 리니어 엔코더에 대한 기본적인 광학계 및 광 신호처리를 통해 실제 변위에 대한 정

보를 분석하였다. 그림 2는 두 위상 신호를 만들기 위한 실험적인 광학계 구성을 나타낸 것이다. 여기서 광원으로서는 633nm의 파장을 갖는 He-Ne 레이저(Uniphase Model-1101p)를 사용하였고, 회절 격자는 피치 간격(P)이 1 μ m이고 홀로그램으로 제작된 회절 격자이며, (1)식에 0차를 기준으로 ± 1 차 회절 광의 각도가 36°이다.

회절된 ± 1 차 두 회절 광은 빔 스플리터에 의해 중첩되어 간섭하며, 결국 이동 정보를 갖는 회절광의 중첩 신호는 광 검출기 PD₁과 PD₂에 의해 검출되어 전기적인 신호로 변환된다. 이 때 광 검출기 PD₁과 PD₂에서 출력되는 신호는 그림 3과 같이 위상이 180° 어긋난 신호가 나타난다.

회절 격자의 이동에 따른 변위량을 검출하기 위해 선형 위치 제어기(LPC)를 사용하여 원하는 변위 만큼 이동시켰으며, 이 때 광 검출기 PD₁, PD₂에서 검출된 두 신호는 필터 및 증폭 회로를 거친 후, 디지털화되어 실제 회절 격자의 변위량이 디스플레이 된다.

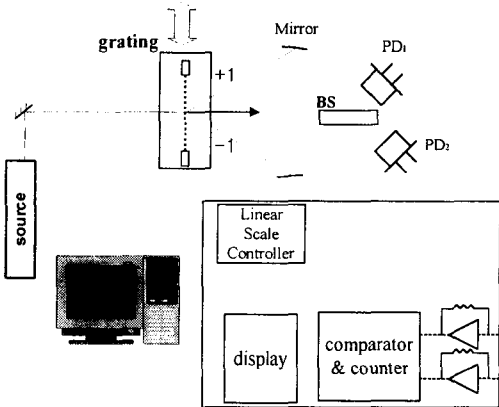


그림 2. 실험 구성. BS:빔스플리터, PD₁,PD₂:광 검출기. LSC:리니어 스케일 컨트롤러

IV. 실험 및 결과

그림 3은 그림 2의 실험 구성에서 광 검출기 PD₁과 PD₂에서 얻어진 광학계 출력을 측정된 파형을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 두 광 검출기 출력 파형의 위상은 180° 어긋남을 확인하였다. 그리고 그림 4는 실제 회절 격자 이동에 따른 4 π 의 위상 변화를 알기 위해 회절 격자를 0.02mm/s로 이동시키고 그 출력을 측정하는 것이다. 여기서 회절 격자 한 피치(P)의 이동에 따라 4 π 의 위상 변화를 나타냄을 확인할 수 있었

다. 출력 파형에서 나타나는 아날로그 출력 파형 B와 디지털 출력 파형 A에서 나타나는 약간의 폭의 차이는 선형 위치 제어기 LPC의 기동 및 정지 시의 모터 특성에 의해 발생하고, 특히 회절 격자의 상태에 많은 영향을 받는다.

그림 5는 회절 격자를 0.5mm/s 속도로 연속 이동했을 때, 나타나는 광 검출기에 의한 출력 B와 그 출력의 디지털화된 출력 파형 A를 나타낸 것이다. 여기서 디지털화된 출력 A는 회절 격자의 이동과 관련된 변위와 일치함을 알 수 있다.

결과적으로 회절 격자 한 피치의 이동에 의해 나타나는 디지털 출력을 카운트함으로써 실제 회절 격자의 이동량을 알 수 있었다. 그림 3-5에서, 아날로그 출력 및 디지털 출력 파형의 크기나 형태에서 볼 수 있는 약간의 어긋남은 주로 회절 격자에 입사하는 빔의 입사각과 깊은 연관을 가지며, 또한 회절 격자의 표면 상태와도 관련된다. 이것은 레이저 엔코더의 정밀도에 영향을 미치며, 이것에 대한 이론값과 본 논문의 실험 구성을 통해 1 μ m 간격으로 LPC를 이동시켰을 때 측정된 값을 그림 6에 나타내었다.

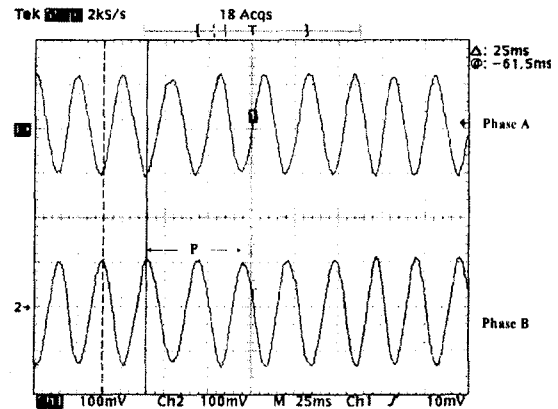


그림 3. 광 검출기 출력. (P는 회절 격자의 한 피치, X는 격자의 변위이며, 회절 격자가 한 피치 이동할 때 4 π 의 위상 변화를 발생시킨다.)

V. 결 론

본 논문에서는 회절 격자의 이동에 따른 출력의 변화를 검출하고 그것을 디지털화하기 위해 기본적인 광학계 및 광 신호 처리 회로를 구성하였으며, 그것을 통해 실제 변위에 대한 정보를

분석하였다. 그 결과에 따르면 격자 한 피치당 4π 의 변화를 나타남을 확인하였으며, 실제 $1\mu\text{m}$ 의 회절 격자를 사용하여 $0.5\mu\text{m}$ 의 분해능을 가짐을 확인할 수 있었으며, 동시에 디지털화함으로써 실제 변위를 쉽게 카운트할 수 있음을 보였다. 따라서 이러한 결과에서 보듯이 분해능을 더 높이기 위해 더 좁은 피치를 갖는 회절 격자를 사용하거나 또는 여러 가지 신호처리 기법 등을 활용할 수도 있다.

참고문헌

- [1] J. Akedo, Y. Kato, and H. Kobayashi, "High-Precisin detection method for the reference position in an optical encoder," *Applied Optics*, vol. 32, no. 3, May 1993.
- [2] 가타오카 소에이, *센서 핸드북(Sensor handbook)*, 서울 世和, 白壽鉉 역편, pp. 483-490, 1990.
- [3] J. R. René Mayer, *Optical Encoder Displacement Sensors, (Measurement Instrument and Sensors Handbook)* CRC Press LLC, 1999.
- [4] M. Dobosz, "High-resolution laser linear encoder with numerical error compensation", *Opt. Eng.* vol. 38, no. 6, pp. 968-973, June 1999.
- [5] R. Sawada, O. Ohguchi, K. Mise, "Fabrication of Advanced Intergrated Optical Micro-encoder Chip,"

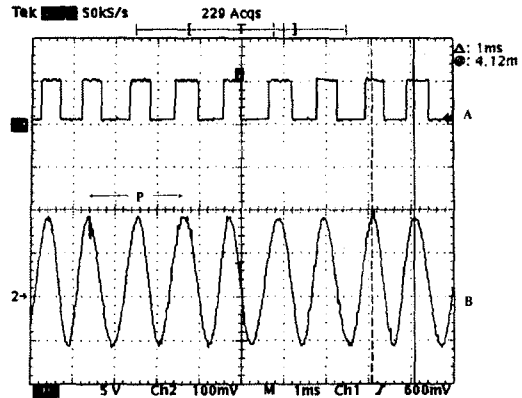


그림 5. 검출된 광 신호와 디지털 출력 (LSC 이동속도 : 0.5mm/s)

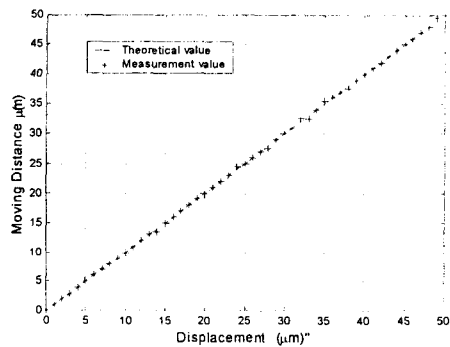


그림 6. 레이저 엔코더의 실제 변위에 대한 이동 거리

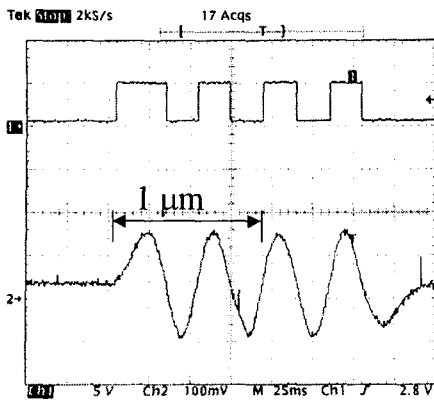


그림 4. 회절격자 이동에 따른 출력 파형(2μm)