

레이저의 간섭무늬를 이용한 리니어 엔코더에 관한 연구

정경민*, 박윤창*

High Resolution Linear Encoder Using Interference Fringe

Kyung-Min Jeong*, Yoon-Chang Park*

Abstract

The main scale of linear encoder greatly effects on the precision of displacement measurement. Especially when needing the long range measurement, the length of main scale should be increased accordingly. In this paper, we propose a linear encoder that uses laser interference pattern as main scale for long range measurement. The linear encoder is similar to Michelson interferometer excepting that the reference mirror is tilted so as to obtain interference fringe pattern and a grating panel is attached on a quadratic photo diodes. Four kinds of grating having phase differences of $0, \pi/4, \pi/2, 3\pi/4$ are arranged on the panel.

The experimental results show that signals of quadratic photo diode A, B, \bar{A} and \bar{B} are cosine wavelike and successive signals have phase difference of $\pi/4$ each other. So the proposed method can achieve improved measurement resolution.

Keywords : optical linear encoder(광학식 리니어 엔코더), length measurement(길이측정), Michelson interferometer (마이켈슨 간섭계)

1. 서 론

정밀 길이측정에 대한 요구는 정밀공학, 광학, 전자공학의 발전에 따라 점점 더 고도화되고 있으며, 나노기술(Nanotechnology)을 "나노영역의 가공과 공차를 가지는 생산기술"이라고 정의한 Taniguchi⁽¹⁾에 의하면 2000년

의 정밀가공기술은 10 nm, 초정밀가공기술은 1 nm 정도로 예측되고 있는데, 이러한 산업의 고도화는 정밀 길이측정기술이 확보되어야만 가능하기 때문에, 정밀 길이측정기술은 산업발전에 기반기술이면서, 산업 고도화에 전인차 역할을 하고 있다.

현재의 보편화된 길이측정의 수단으로 광학식 리니어

* 선문대학교 공과대학 기계 및 제어공학부

엔코더(Optical Linear Encoder)이 사용되고 있는데^[2-8], 이는 피치(Pitch) $4\ \mu\text{m}$ 내지 $20\ \mu\text{m}$ 정도의 메인격자(Main Grating)를 이용하여 $1\ \mu\text{m}$ 내지 $5\ \mu\text{m}$ 정도의 분해능을 얻고 있으며, 초정밀급으로는 빛의 회절과 간섭 현상을 이용한 회절형 광학식 리니어 엔코더로서 피치가 $0.5\ \mu\text{m}$ 이하인 회절격자(Diffraction Grating)를 이용한 것으로서 이의 출력신호를 분주하여 $1\ \text{nm}$ 정도의 분해능을 얻고 있다. 하지만, 이러한 광학식 리니어 엔코더에서는, 길이정보를 지니는 미소피치의 메인격자(Main Grating)가 측정길이만큼 필요하게되고, 길이측정값의 정확도는 메인격자의 피치 정확성에 좌우되며 길이측정값의 분해능은 메인격자의 피치에 의존하기 때문에, 측정길이 긴 경우에는 리니어 엔코더의 가격이 측정길이에 비례적으로 증가하게 된다.

본 연구에서는, 종래의 리니어 엔코더에서 길이정보를 얻기 위해서 사용하는 메인격자를 사용하지 않고, 측정용 광원으로 주로 사용되는 파장 $632.8\ \text{nm}$ 의 He-Ne 레이저의 파동성을 이용하여 메인격자와 동일한 효과를 얻고 있다. 마이켈슨 간섭계(Michelson Interferometer)^[9]에서 한쪽 거울을 기울이면 등간격의 직선 간섭무늬(Interference Fringe)를 얻게되는데, 이 간섭무늬는 일정한 간격마다의 광학적인 신호로 나타나기 때문에 메인격자와 동일하게 이용될 수 있다. 이는 측정길이에 관계없이 간섭무늬가 얻어질 수 있기 때문에 측정길이가 길어져도 부가적인 비용이 추가되지 않으며, 기존의 일반적인 리니어 엔코더보다 피치간격이 조밀하기 때문에 쉽게 분해능을 높일 수 있는 잇점이 있다.

2. 간섭무늬를 얻기 위한 광학계

본 연구에서는, 광의 파동성에 기인한 간섭현상을 이용하고, 여기서 형성된 직선형태의 간섭무늬(Interference Fringe)에서 길이정보를 얻고 있으며, 광학적인 신호를 전기적인 신호로의 변환을 위해서 인덱스 격자(index grating)와 4분할 포토다이오드(Quadratic Photo-Diode)를 사용하고 있다.

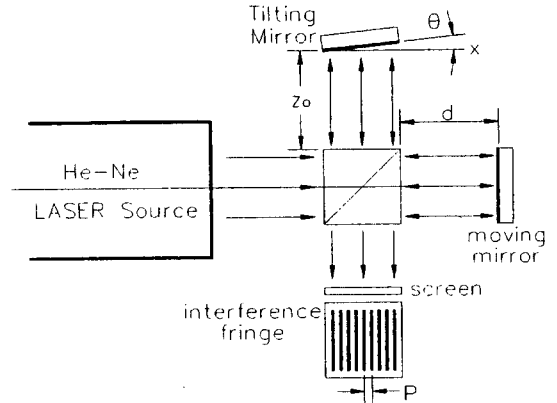


Fig. 1 Schematic diagram of optical system

광학식 리니어 엔코더에서의 메인격자와 동일한 효과를 얻기 위해서, 본 연구에서는 가산성이 뛰어난 레이저를 이용한 광위상 간섭을 이용한다. 이의 기본원리는 파동광학을 기본으로 하는 마이켈슨 방식의 광위상 간섭계로서 광학적인 구성은 Fig. 1과 같다.

Fig. 1에서 파장이 λ 인 He-Ne 레이저광은 광분할기(Beam Splitter)에 도달하여 두 부분으로 나뉘어지게 된다. 분할된 광중 직선 성분은 이동반사경 Mm(Moving Mirror)에 도달해 반사를 일으키고 되돌아오며, 광 분할기에 의해 반사된 광 성분은 경사반사경 Mt(Tilting Mirror)면에서 반사를 일으켜 되돌아 온다. 반사경 Mt와 Mm으로부터 반사되어 돌아오는 광은 다시 광분할기에서 합쳐지며, 두 반사경의 상대 위치에 따른 광경로차(Optical Path Difference)에 의하여 간섭무늬(Interference Fringe)를 형성한다. 이동반사경 Mm에서 반사되어온 광은 전면에 걸쳐 동일 위상을 가지며, 그 파두면은 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$W_m = a \cdot \exp(2jkd) \quad (1)$$

여기서, a 는 측정 반사경의 반사광 진폭, d 는 광 분할기와 기준 반사경 사이 거리이고, j 와 k 는 각각 $\sqrt{-1}$ 과 $2\pi/\lambda$ 이다.

경사반사경 Mt이 θ 만큼 기울어져 있을 때 반사경 표

면은 위치 x 에 따라 다음 식으로 표현될 수 있다.

$$z(x) = \tan \theta \cdot x + z_0 \quad (2)$$

여기서 z_0 는 동일 위상으로부터의 거리를 나타낸다.

그러므로, 경사반사경 Mt에서 반사된 광의 파두면은 경사반사경 Mt 표면위치에 따른 함수로 식(3)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} W_t &= b \cdot \exp(2jkz(x)) \\ &= b \cdot \exp 2jk[\tan \theta \cdot x + z_0] \quad (3) \end{aligned}$$

여기서, b 는 경사반사경 Mt의 반사광 진폭이고, $z(x)$ 는 경사반사경 Mt 표면의 위치 함수이다. 이동반사경 Mm과 경사반사경 Mt에서 반사된 두 광의 파두면은 광분할기에서 합쳐지면서, 두 광의 광경로차에 따라 발생하는 파두면의 위상차에 의해서 간섭무늬가 생성되는데 이와 같은 간섭무늬 세기(Intensity)는 식(1)과 식(3)으로부터

$$\begin{aligned} I(x) &= |W_m + W_t|^2 \\ &= |a \cdot \exp(2jkd) + b \cdot \exp(2jkz(x))|^2 \\ &= a^2 + b^2 + 2ab \cdot \cos[2k(d - z(x))] \\ &= I_0 \{1 + \gamma \cdot \cos[2k(d - z(x))]\} \\ &= I_0 \{1 + \gamma \cdot \cos[2k(d - \tan \theta \cdot x - z_0)]\} \quad (4) \end{aligned}$$

와 같은 식으로 표현 될 수 있다.

여기서, I_0 는 간섭무늬 평균세기를 나타내며,

$I_0 = a^2 + b^2$ 와 같이 표현되고, γ 는 간섭무늬 대비

(Fringe Contrast)로 $\gamma = \frac{2ab}{a^2 + b^2}$ 와 같으며, k 는 $2\pi/\lambda$ 인 상수를 나타낸다.

식(4)에 의하여 생성된 간섭무늬 $I(x)$ 의 형태는 경사반사경 Mt에 대한 이동반사경 Mm의 공간적 위치에 따라 주기적인 형태의 영상을 나타내게 된다. 여기서의 간섭 줄무늬의 피치(Pitch, P)는 사용되는 광의 파장(Wave

Length, λ)와 경사거울(Tilting Mirror)의 경사각(Tilting Angle, θ)에 의해 결정되는데 다음과 같은 관계를 가지게된다.

$$P = \frac{\lambda/2}{\tan \theta} \quad (5)$$

그리고 이동거울이 x 축 방향으로 L 만큼 이동하면 간섭무늬는 줄무늬의 직각방향으로 이동하게되는데 이 양을 l 이라 하면 이는 다음과 같이 구해진다.

$$l = \frac{L}{\lambda/2} \cdot P \quad (6)$$

이 식을 보면 이동거울이 $\lambda/2$ 만큼 이동하면 간섭 줄무늬는 한 피치를 이동하게 됨을 알 수 있다. 따라서, 측정용으로 많이 이용되는 He-Ne레이저로서 632.8 nm 파장의 광원을 사용할 경우 피치가 0.3164 μm 인 격자를 용이하게 구현할 수 있는 장점을 가질 수 있다.

이는 현재 통상적으로 사용되고 있는 광학식 리니어엔코더(Optical Linear Encoder)에서 피치가 4 μm 내지 20 μm 의 격자를 사용하고 있는 것과 비교해 볼 때 위치 검출 분해능을 월등히 향상시킬 수 있다.

3. 실험

본 연구에서 제안하는 방식의 광학식 리니어 엔코더를 종래의 방식과 비교해 볼 때 길이정보를 발생시키는 방식은 다르지만 인덱스 격자와 수광소자는 동일하기 때문에, 본 실험에서는 광 간섭무늬로부터 위상이 각각 90도가 차이나는 A , B , \bar{A} 및 \bar{B} 신호를 얻어서 기존의 광학식 리니어 엔코더에서 통상적으로 이용되고 있는 4채배기법을 사용하였다.

3.1 실험 장치의 구성

Fig.2는 본 실험에서 구성된 실험장치의 구성을 보여주고 있으며, Fig. 3은 실험장치의 사진이다. 여기서는 파장 632.8 nm의 He-Ne 레이저(5 mW)에서 나온 광이 직경 20 mm로 확대되어 광분할기로 입사되고, 분할

된 두 개의 광은 각각 경사 거울과 이동 거울에서 반사되어 4분할 포토다이오드로 입사하게 된다.

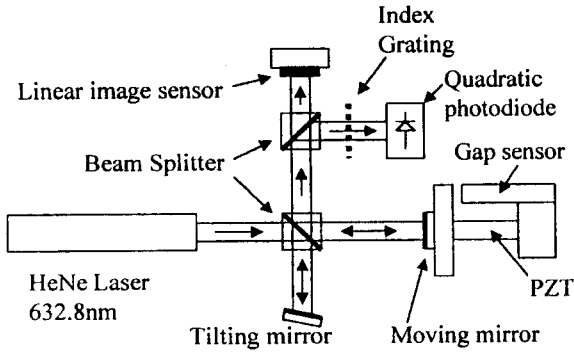


Fig. 2 Configuration of experimental setup

한 간격의 줄무늬패턴을 형성시키게 된다. 포토다이오드 앞에 설치된 인덱스 격자는 위상이 다른 4개의 신호를 얻기 위해서 4개 영역으로 나누어져 있고, 각각은 1.16mm 피치로서 한 피치내에서 50%는 투과되고, 50%는 차단되도록 제작되었는데 이의 형상은 Fig. 4에 표시되고 있다.

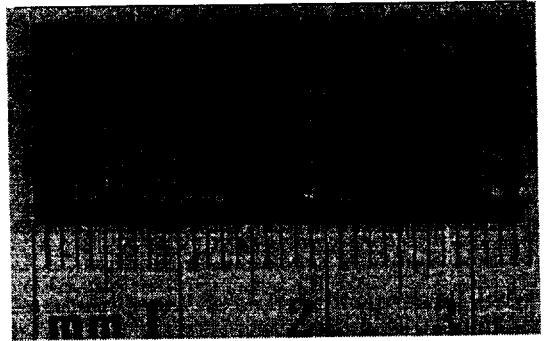
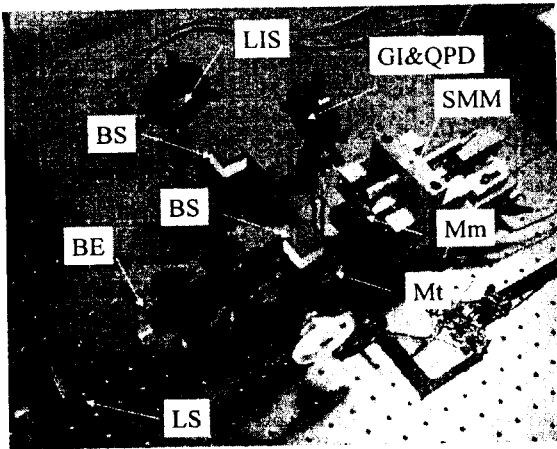


Fig. 4 Index grating and photo-diode



LS:Laser Source, BE: Beam Expander, BS:Beam Splitter, Mt:Tilting Mirror, Mm:Moving Mirror, SMM:Straight Motion Mechanism, GI: Index Grating, QPD: Quadratic Photo Diode, LIS:Linear Image Sensor

Fig. 3 Overview of experimental setup

포토다이오드에서는 두 광의 경로차이로 인해서 간섭현상이 발생되는데 경사거울의 경사각도에 따라 되어 일정

여기서는 미세조정 나사를 사용하여 경사 거울의 각도를 조정하여 간섭무늬의 피치를 조절하고 있는데, 이때 형성된 간섭무늬의 피치를 인덱스 격자의 피치와 일치시키기 위해서 선형이미지센서가 이용되었다. 여기에 사용된 4분할 포토다이오드는 HAMAMATSU사의 S5106이고, 선형 이미지 센서는 OKI사의 MOS이미지 센서인 OPA512T가 사용되었는데, 이들의 주요 사양은 각각 Table 1과 Table 2에 나타나 있다. 이동 거울을 구동하고 이때 발생된 변위량을 측정하기 위해서 판스프링 구조를 운동 안내면으로 사용하는 정밀 이송계가 구성되었는데, 이것은 Fig. 5에 표시되고 있다.

Table 1 Specification of S5106

Active Area (mm)	Spectral Response Range(nm)	Photo Sensitivity (at 660nm) (A/W)	Short Circuit Current (μ A)	Dark Current (nA)
10×10	320 to 1100	0.45	110	0.9(Typ) 10(Max)

Table 2 Specification of OPA512T

Item	Symbol	Spec.	Unit
Number of photodiodes		512	
Photodiode pitch		25	μm
Light-sensing width		25	μm
Photodiode sensitivity		3	pA/lux
Uniformity(overall)	U	± 8	%
Uniformity(partial)	U_i	± 10	%
Dark current ratio	I_d/I_{sat}	MAX 5	%
Saturation exposure	E_{sat}	TYP 1.5	lux · sec
Saturation charge	Q_{sat}	4	p Coul
Clock frequency	f_{ϕ}	1 to 1000	kHz

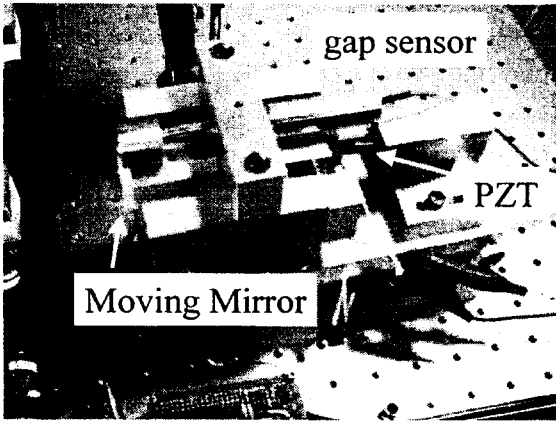


Fig. 5 Moving stage using PZT and leaf spring

Table 3 Specification of AE0505D16

Item	Spec.	Unit
Driving Voltage(DC)	TYP. 100 , MAX. 150	V
Displacement	TYP. 6.1 ± 1.5 , max. 9.1 ± 1.5	μm
Generated Force	850	N
Resonance frequency	69	kHz
Rensile strength	100	N
Young's modulus	4.4×10^{10}	N/m^2

미소구동을 위해 TOKIN사의 PZT(Piezoelectric Transducer - AE0505D16)가 사용되었고, 미소 변위 측정을 위해서는 ADE사의 정전용량형 캡센서(ADE-2102)가 사용되었는데, 압전 구동기의 사양은 Table. 3에 표시되어 있으며 변위 센서와 앰프는 $1.0 \text{ V}/\mu\text{m}$ 의 출력을 가지도록 조정하였다.

3.2 실험 결과 및 고찰

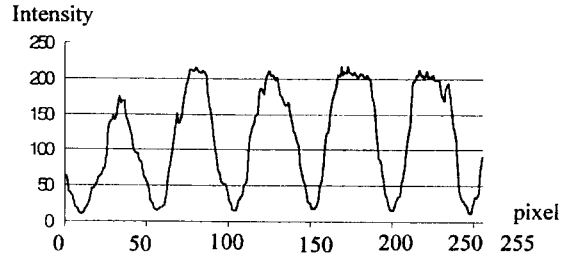
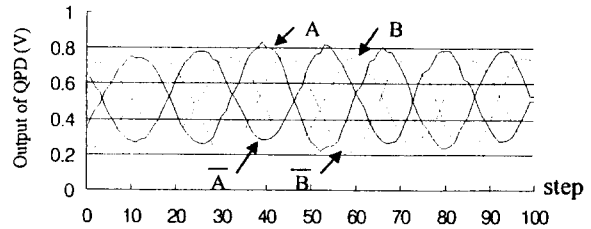
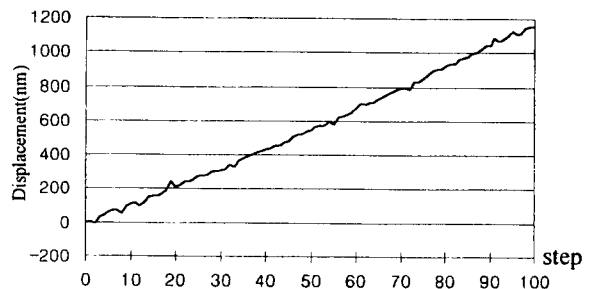


Fig. 6 Output of linear image sensor



(a) signals of the quadratic photo diode



(b) signal of the gap sensor

Fig. 7 Signal outputs of QPD and gap sensor

4분할 포토다이오드에 형성되는 간섭무늬의 피치를 확인하기 위해서 사용된 선형 이미지 센서의 출력신호가 Fig. 6에 표시되어 있다. 이 출력신호의 주기를 인덱스 격자의 피치 1.16 mm와 일치하도록 미세 조정나사를 이용하여 조절하였다.

Fig. 7은 정밀이송계의 압전구동기(PZT)를 0.125V씩 증가시켜 100스텝을 구동할 때 4분할 포토 다이오드의 신호와 캡센서 신호를 나타내고 있다. 압전구동기에 의해 1스텝당 약11.85nm씩 일정하게 구동함에 따라 4분할 포토 다이오드의 신호 A , B , \bar{A} 및 \bar{B} 가 위상이 각각 90도가 차이는 Cosine함수 형태로 나타나고 있음을 볼 수 있다.

Fig. 7(a)에서의 신호 A 와 \bar{A} 그리고 B 와 \bar{B} 는 각각 비교기에서 구형파로 변환되어 UP/DOWN카운터(counter, LSI사의 LS7166)에 입력된다. 카운터에서는 사용된 레이저 파장이 632.8 nm이기 때문에 4채배되어 최종적으로는 파장의 1/8인 79.1 nm마다 카운터를 증가시키게 된다. Fig. 8은 압전구동기를 100스텝 구동할때 캡센서에서 측정된 변위("G"로 표시되어 있음)와 카운터의 출력에서 구해진 변위(79.1nm × 카운터값, "C"로 표시되어 있음)를 비교한 것이다. 이 결과에 의하면 캡센서에서 확인된 변위량 1168 nm에서 본 연구에서 개발된 리니어 엔코더의 오차를, 캡센서의 변위값과의 차이로 표시하면 표준편차는 $\sigma = 28.27$ nm로 나타났다.

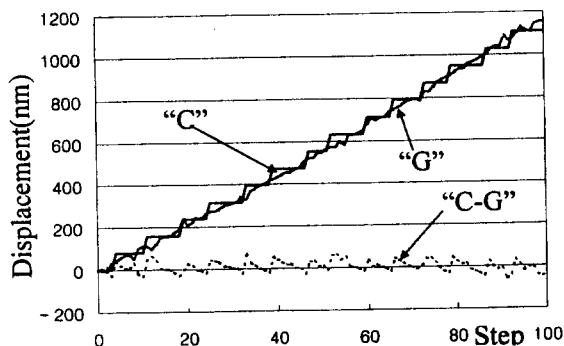


Fig. 8 Measured displacement by gap sensor and counter

4. 결 론

본 연구는 기존의 광학식 리니어 엔코더의 분해능을 향

상시키기 위해서, 레이저의 파동성을 이용하여 메인격자와 동일한 효과를 얻고 있다. 이 실험에서 사용된 레이저 파장이 632.8 nm이기 때문에 4분할 포토다이오드의 출력을 4채배하여 최종적으로는 파장의 1/8인 79.1 nm의 분해능을 얻을 수 있음을 확인 할 수 있다. 또한 캡센서와의 변위 측정치 비교에서, 본 연구에서 개발된 리니어 엔코더의 오차를 캡센서에서의 변위값과의 차이로 표시하면 표준편차는 $\sigma = 28.27$ nm로 나타났다. 이는 기존에 일반적으로 사용되고 있는 광학식 리니어 엔코더에서 피치가 4 μm 내지 20 μm 정도의 메인격자로부터 4채배하여 얻을 수 있는 분해능과 비교해 볼 때 약 12배 이상의 분해능 향상을 기대할 수 있다.

5. 인 용 문 헌

- [1] N. Taniguchi, "Current status in the future trends of ultra precision machining and ultrafine processing", Ann. CIRP, Vol.32 No.2, pp.573, 1983.
- [2] H. Kunzmann and T. Pfeifer, "Performance and Comparison Two Measuring System", Ann. CIRP Vol. 42 No. 2, pp.753-767, 1993.
- [3] A. Teimel, "Technology and Application of Grating Interferometers in High Precision Measurement", Progress in Prec. Engg., Proc. of the 6th IPES/2nd UME, pp.15-30, Springer, Berlin 1991.
- [4] W. Tyler Estler, "High accuracy displacement interferometry in air", Applied Optic, Vol.32, pp.808-815, 1985
- [6] G. Ulbers, "A sensor for dimensional metrology with an interferometer using intergrated optics technology", Measurement, Vol.9, No.1, 1991
- [7] 한용교외 5인, "He-Ne 레이저를 이용한 고정밀 리니어 스케일의 제작에 관한 연구", 한국정밀공학회지, 제8권 제3호, pp.82-92, 1991.
- [8] Cesar A.Sciammarella, "The Moire Method-A Review", Experimental Mechanics, November, pp.418-433, 1982.
- [9] F. A. Jenkins and H. E. White "Fundamentals of Optics", 4th Ed., McGraw-Hill, 1976