

레이저를 이용한 광학식 리니어 스케일의 분해능 향상에 관한 연구

High resolution linear scale using collimated LASER

박윤창, 정경민

선문대학교 공과대학 기계 및 제어공학부

Abstract

The main scale of linear scale greatly affects 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 scale that uses laser interference pattern as main scale for long range measurement. The linear scale 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 scale(광학식 리니어 스케일), length measurement(길이측정), Michelson interferometer(마이켈슨 간섭계)

1. 서론

정밀 길이측정에 대한 요구는 정밀공학, 광학, 전자공학의 발전에 따라 점점 더 고도화되고 있으며, 나노기술(Nanotechnology)을 "나노영역의 가공과 공차를 가지는 생산기술"이라고 정의

한 Taniguchi^[1]에 의하면 2000년의 정밀가공기술은 10nm, 초정밀가공기술은 1nm 정도로 예측되고 있는데, 이러한 산업의 고도화는 정밀 길이 측정 기술이 확보되어야만 가능하기 때문에, 정밀 길이 측정 기술은 산업발전에 기반기술이면서, 산업 고도화에 견인차 역할을 하고 있다.

현재의 보편화된 길이 측정의 수단으로 광학식 리니어 스케일(Optical Linear Scale)이 사용되고 있는데^[2,3,4,5,6], 이는 피치(pitch) $4\mu\text{m}$ 내지 $20\mu\text{m}$ 정도의 메인 격자(main grating)를 이용하여 $1\mu\text{m}$ 내지 $5\mu\text{m}$ 정도의 분해능을 얻고 있으며, 초정밀급으로는 빛의 회절과 간섭현상을 이용한 회절형 광학식 리니어 스케일로서 피치가 $0.5\mu\text{m}$ 이하인 회절격자(Diffraction grating)를 이용한 것으로서 이의 출력신호를 분주하여 1nm 정도의 분해능을 얻고 있다. 하지만, 이러한 광학식 리니어 스케일에서는, 길이정보를 지니는 미소피치의 메인 격자(main grating)가 측정길이만큼 필요하게 되고, 길이 측정값의 정확도는 메인 격자의 피치 정확성에 좌우되며 길이 측정값의 분해능은 메인 격자의 피치에 의존하기 때문에, 측정길이가 긴 경우에는 리니어 스케일의 가격이 측정길이에 비례적으로 증가하게 된다.

본 연구에서는, 종래의 리니어 스케일에서 길이 정보를 얻기 위해서 사용하는 메인 격자를 사용하지 않고, 측정용 광원으로 주로 사용되는 파장 632.8nm 의 He-Ne 레이저의 파동성을 이용하여 Main grating과 동일한 효과를 얻고 있다. 마이켈슨 간섭계(Michelson Interferometer)^[7]에서 한 쪽 거울을 기울이면 등간격의 직선 간섭무늬(interference fringe)를 얻게 되는데, 이 간섭무늬는 일정한 간격마다의 광학적인 신호로 나타나기

때문에 메인격자와 동일하게 이용될 수 있다. 이는 측정길이에 관계없이 간섭무늬가 얻어질 수 있기 때문에 측정길이가 길어지더라도 부가적인 비용이 추가되지 않으며, 기존의 일반적인 리니어 스케일보다 피치간격이 조밀하기 때문에 쉽게 분해능을 높일 수 있는 잇점이 있다.

2. 간섭무늬를 얻기 위한 광학계

본 연구에서는, 광의 파동성에 기인한 간섭 현상을 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.

광학식 리니어 스케일에서의 메인 격자와 동일한 효과를 얻기 위해서, 본 연구에서는 코히어런스(coherence)가 뛰어난 레이저를 이용한 광위상 간섭을 이용한다. 이의 기본원리는 파동광학을 기본으로 하는 마이켈슨 방식의 광위상 간섭계로

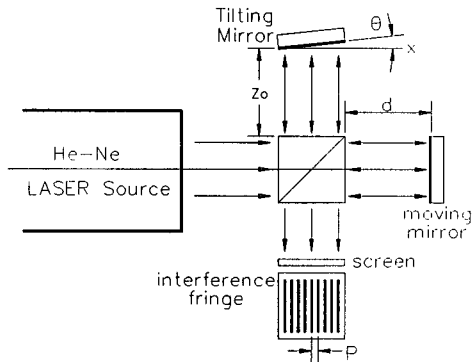


Fig. 1 Schematic diagram of optical system
서 광학적인 구성은 Fig.1과 같다.

Fig.1에서 파장이 λ 인 He-Ne 레이저광은 광분할기(beam splitter)에 도달하여 두 부분으로 나뉘어지게 된다. 분할된 광중 직선 성분은 이동 반사경(Moving mirror) Mm에 도달해 이동 반사경으로부터 반사를 일으키고 되돌아오며, 광분할기에 의해 반사된 광 성분은 경사 반사경(Tilting mirror) Mt 면에서 반사를 일으켜 되돌아 온다. 반사경 Mt, Mm로부터 반사되어 돌아오는 광은 다시 광분할기에서 합쳐지며, 두 반사경

의 상대 위치에 따른 광경로차(optical path difference)에 의하여 간섭무늬(interference fringe)를 형성한다. 이동 반사경 Mm에서 반사되어 온 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 광분할기와 기준 반사경 사이 거리이고, j 와 k 는 각각 $\sqrt{-1}$ 과 $2\pi/\lambda$ 이다.

경사 반사경이 θ 만큼 기울어져 있을 때 반사경 표면은 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, 경사 반사경에서 반사된 광의 파두면은 경사 반사경 Mt 표면위치에 따른 함수로 식(3)과 같이 표현된다.

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

여기서, b 는 경사 반사경 Mt의 반사광 진폭이고, $z(x)$ 는 경사 반사경 표면의 위치 함수이다. 이동 반사경과 경사 반사경에서 반사된 두 광의 파두면은 광분할기에서 합쳐지면, 두 광의 광경로차에 따라 발생하는 파두면의 위상차에 의해서 간섭무늬가 생성되는데 이와 같은 간섭무늬 세기(intensity)는 식(1)과 식(3)으로부터

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

와 같은 식으로 표현 될 수 있다.

여기서, I_0 는 간섭무늬 평균세기를 나타내며,

$$I_0 = a^2 + b^2 \text{와 같이 표현되고, } \gamma \text{는 간섭무늬 대비(fringe contrast)로 } \gamma = \frac{2ab}{a^2 + b^2} \text{와 같으며, } k \text{는 } 2\pi/\lambda \text{인 상수를 나타낸다.}$$

식(4)에 의하여 생성된 간섭무늬 $I(x)$ 의 형태는 경사 반사경에 대한 이동 반사경의 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 가지게 된다.

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

그리고 이동거울이 x축 방향으로 L만큼 이동하면 간섭무늬는 줄무늬의 직각방향으로 이동하게 되는데 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 $0.6328 \mu\text{m}$ 파장의 광원을 사용할 경우 피치가 $0.3164 \mu\text{m}$ 인 격자를 용이하게 구현할 수 있는 장점을 가질 수 있다.

이는 현재 통상적으로 사용되고 있는 광학식 선형스케일(Optical Linear Scale)에서 피치가 $4 \mu\text{m}$ 내지 $20 \mu\text{m}$ 의 격자를 사용하고 있는 것과 비교해 볼 때 위치검출 분해능을 월등히 향상시킬 수 있다.

3. 실험

본 연구에서 제안하는 방식의 광학식 리니어

스케일을 종래의 방식과 비교해 볼 때 길이정보를 발생시키는 방식은 다르지만 인덱스 격자와 수광소자는 동일하기 때문에, 본 실험에서는 위상이 각각 90도가 차이나는 A, B, \bar{A} 및 \bar{B} 신호를 얻는데까지만 실시되었다. 이 4개의 신호를 이용하여 길이를 측정하는 과정은 동일하기 때문에 생략한다.

3.1 실험 장치의 구성

Fig.2는 본 실험에서 구성된 실험장치의 구성을 보여주고 있으며, Fig. 3은 실험장치의 사진이다.

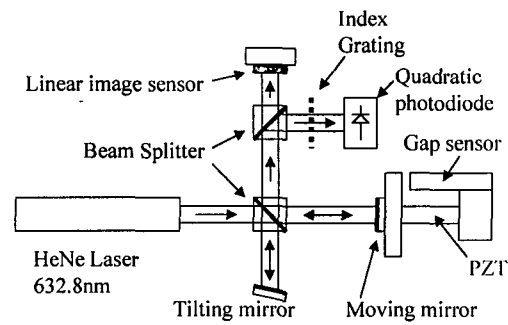
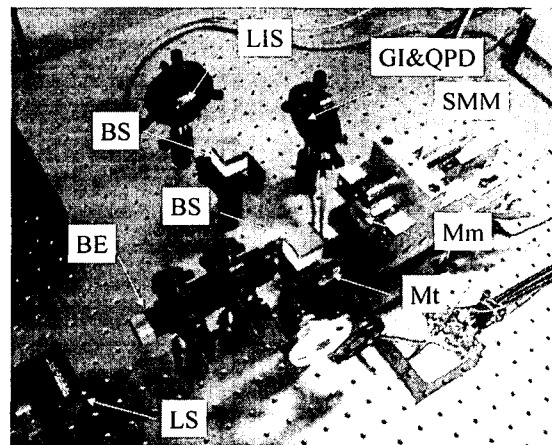


Fig. 2 Configuration of experimental setup



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

여기서는 파장 633nm의 He-Ne 레이저

(5mW)에서 나온 광이 직경 20mm로 확대되어 광분할기로 입사되고, 분할된 두 개의 광은 각각 경사 거울과 이동 거울에서 반사되어 4분할 포토다이오드로 입사하게 된다. 포토다이오드에서는 두 광의 경로차이로 인해서 간섭현상이 발생되는데 경사거울의 경사각도에 따라 되어 일정한 간격의 줄무늬패턴을 형성시키게 된다. 포토다이오드 앞에 설치된 인덱스 격자는 위상이 다른 4개의 신호를 얻기 위해서 4개 영역으로 나누어져 있고, 각각은 1.16mm피치로서 한 피치내에서 50%는 투과되고, 50%는 차단되도록 제작되었는데 이의 형상은 Fig.4에 표시되고 있다. 여기서는 미세조정 나사를 사용하여 경사 거울의 각도를 조정하여 간섭무늬의 피치를 조절하고 있는데, 이때 형성된 간섭무늬의 피치를 인덱스 격자의 피치와 일치시키기 위해서 선형이미지센서가 이용되었다.

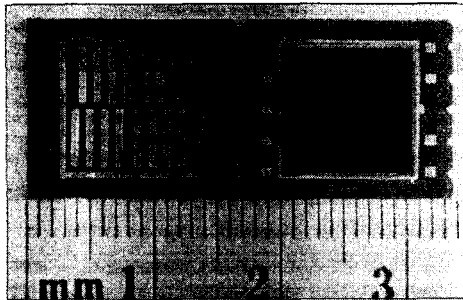


Fig. 4 Index grating and photo-diode

여기에 사용된 4분할 포토다이오드는 HAMAMATSU사의 S5106이고, 선형 이미지 센서는 OKI사의 MOS이미지 센서인 OPA512T가 사용되었는데, 이들의 주요 사양은 각각 Table 1과 Table 2에 나타나 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)

이동 거울을 구동하고 이때 발생된 변위량을 측

정하기 위해서 판스프링 구조를 운동 안내면으로 Table 2 Specification of OPA512T

Item	Symbol	Spec.	Unit
Number of photodiodes		512	
Photodiode pitch		25	μ m
Light-sensing width		25	μ m
Photodiode sensitivity		3	μ A/lux
Uniformity(overall)	U	± 8	%
Uniformity(partial)	U _i	± 10	%
Dark current ratio	Id/Isat	MAX 5	%
Saturation exposure	Esat	TYP 1.5	lux · sec
Saturation charge	Qsat	4	μ Coul
Clock frequency	f _ϕ	1 to 1000	kHz

사용하는 정밀 이송계가 구성되었는데, 이것은 Fig. 5에 표시되고 있다.

미소구동을 위해 TOKIN사의 압전 구동기 (piezoelectric actuator - AE0505D16)가

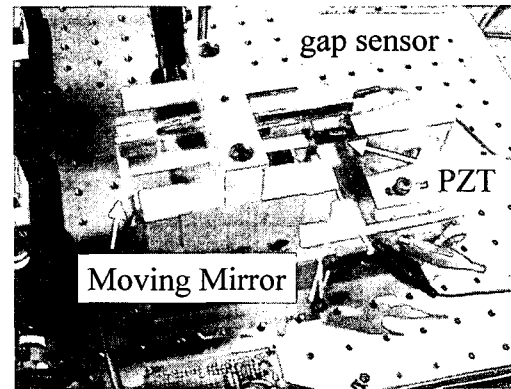


Fig. 5 Moving stage using PZT and leaf spring

사용되었고, 미소변위 측정을 위해서는 ADE사의 정전용량형 캡센서(ADE-2102)가 사용되었는데, 압전 구동기의 사양은 Table. 3에 표시되어 있으며 변위 센서와 앰프는 1.0V/ μ m의 출력을 가지도록 조정하였다.

Table 4 Specification of AE0505D16

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

3.2 실험 결과 및 고찰

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

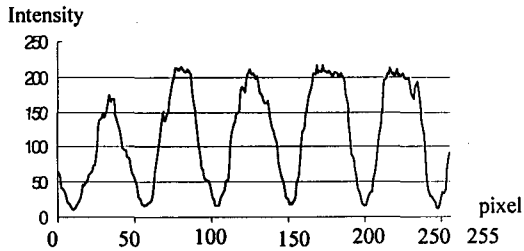


Fig. 6 Output of linear image sensor

Fig.7은 정밀이송계의 PZT를 0.125V씩 증가시켜 100스텝을 구동할 때 4분할 포토 다이오드의 신호와 갭센서 신호를 나타내고 있다.

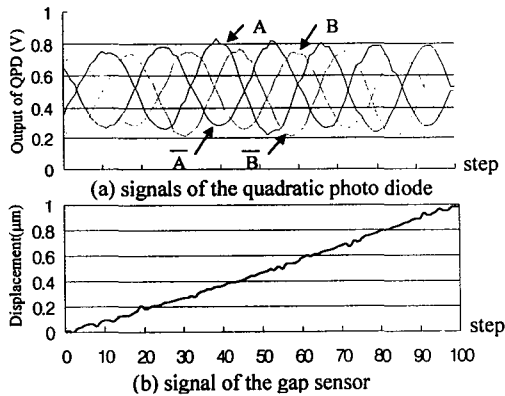


Fig. 7 Signal outputs of QPD and gap sensor

압전구동기에 의해 1스텝당 약10nm씩 일정하게 구동함에 따라 4분할 포토 다이오드의 신호 A, B, \bar{A} 및 \bar{B} 가 위상이 각각 90도가 차이나는 cosine함수 형태로 나타나고 있음을 볼 수 있다.

4. 결론

본 연구는 기존의 광학식 리니어 스케일의 분해능을 향상시키기 위해서, 레이저의 파동성을 이

용하여 메인 격자와 동일한 효과를 얻고 있다. 이 실험에서 사용된 레이저 파장의 632.8nm이기 때문에 4분할 포토다이오드의 출력을 4배배할 경우에 최종적으로는 파장의 1/8인 79.1nm의 분해능을 얻을 수 있음을 확인 할 수 있다. 이는 기존에 일반적으로 사용되고 있는 광학식 리니어 스케일의 메인 격자의 피치가 $4\mu\text{m}$ 내지 $20\mu\text{m}$ 정도인 것과 비교해 볼 때 약 12배 이상의 분해능 향상을 기대할 수 있다.

5. 인용문헌

- [1] N. Taniguchi, "Current status in the future trends of ultra precision machining and ultrafine processing", Ann. CIRP, Vol.32 No.2, pp573, 1983.
- [2] H. Kunzmann and T. Pfeifer, "Performance and Comparison Two Measuring System", Ann. CIRP Vol. 42 No. 2, pp753-767, 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, pp808-815, 1985
- [5] Norman Bobroff, "Residual errors in laser interferometry from air turbulence and nonlinearity", Applied Optics, Vol. 26, No. 13, 1987
- [6] G. Ulbers, "A sensor for dimensional metrology with an interferometer using intergrated optics technology", Measurement, Vol.9, No.1, 1991
- [7] F. A. Jenkins and H. E. White "Fundamentals of Optics", 4th Ed., Mc Graw-Hill, 1976