

Four-bucket 알고리즘을 이용한 레이저 간섭계

박윤창*, 정경민*

Multiphase Homodyne Laser Interferometer with Four Bucket

Yoon-Chang Park* and Kyung-Min Jeong*

ABSTRACT

By tilting the reference mirror of Twyman-Green interferometer having a reference mirror and a moving mirror, fringe pattern composed of bright and dark parallel lines can be obtained and the fringe pattern is shifted according to the displacement of the moving mirror. Several studies are executed for displacement measurement by detecting the intensity of the fringe with photo-diodes having small detecting area. In this study, to improve the sensitivity and robustness, the intensity of fringe is detected by using a large-area quadratic photo-diode masked with a grating panel having four kinds of binary grating having phase-difference of 0 , $\pi/4$, $\pi/2$, $3\pi/4$. The phase of the fringe is calculated with a simple 4-buckets algorithm. A experimental result shows that standard deviation of 5.653 nm is obtained comparing with a capacitive type gap sensor having nearly 1 nm accuracy.

Key Words : laser interferometer(레이저 간섭계), displacement measurement(변위측정), Twyman-Green interferometer(트위만그린 간섭계), phase grating(위상격자), multi-phase(다중위상), four-bucket(4버킷), four-fold(4채배)

1. 서론

초정밀 길이측정에 대한 요구는 정밀공학, 광학, 전자공학의 발전에 따라 점점 더 고도화되고 있으며, Taniguchi⁽¹⁾는 2000년의 정밀가공기술은 10nm, 초정밀가공기술은 1nm정도로 예측하면서, 나노기술(Nanotechnology)을 "나노영역의 가공과 공차를 가지는 생산기술"이라고 정의하고 있다. 이러한 산업의 고도화는 정밀 길이 측정기술이 확보되어야만 가능하기 때문에, 정밀 길이측정 기술은 산업발전에 기반기술이면서, 산업 고도화에 건인차 역할을 하고 있다.

현재의 nm 혹은 sub-nm급의 분해능이 요구되는 초정밀 길이측정의 수단으로 레이저 간섭계(Laser interferometer)이 사용되고 있는데⁽²⁾, 이는 1887년 Michelson이 Cd 램프(lamp)를 이용하여 최초로 거리를 측정한 이래 많은 연구가 진행되어 왔으며, 특히 1983년에 제 17차 국제도량형 총회에서 미터의 정의가 빛이 진공중에서 일정 시간동안 진행한 거리로 정해짐에 따라 레이저 간섭계에 대한 중요성은 더욱 커졌다. 이 분야의 연구현황을 살펴보면, 먼저 길이측정의 기준이 되는 주파수 안정화에 관한 연구^(3,4)가 진행되어 현재 10^{-8} 내지 10^{-9} 의 안정도를 얻고 있으며, 간

* 선문대학교 기계 및 제어 공학부

잡계의 분해능을 광학적으로 높이기 위하여 멀티패스(multi-pass)형의 광학계에 관한 연구결과로 0.6nm의 분해능을 내고 있다.⁽¹⁵⁾ 그리고 측정환경의 영향에서 발생하는 측정 불확도를 줄이기 위한 연구^(16,17)로서 공기의 굴절률 보상을 통해서 5×10^{-8} 의 불확도를 얻었다고 발표되고 있다⁽¹⁸⁾. 이러한 레이저 간섭계는 이중 주파수의 광을 이용하는 헤테로다인(Heterodyne)방식과 단일 주파수의 광을 이용하는 호모다인(Homodyne)방식으로 분류될 수 있는데, 헤테로다인 방식에서는 기준광의 위상과 측정광의 위상의 차를 계측하여 길이를 측정하는 방식으로 ± 0.1 도의 위상오차를 달성하고 있다.^(11, 12) 호모다인 방식에서는 2개내지 4개의 위상을 검출하여 측정광의 위상을 분주하고 있는데 이 또한 서브나노(sub-nano) 분해능의 가능성을 보여 주고 있다.⁽¹³⁻¹⁵⁾

본 연구에서는, 트위만-그린 간섭계(Twyman-Green interferometer)에서 기준광을 경사시켜 측정광과 간섭을 일으켜서 직선 줄무늬형태의 간섭무늬(interference fringe)를 얻고, 광학식 리니어 엔코더(optical linear encoder)에서의 위상 격자(index grating, 이후부터 "phase grating"으로 표기 함)와 4분할 수광소자(quadratic photo-diode)를 이용하여 각각 90도씩 차이나는 4개의 위상을 검출하여 길이를 측정하는 방법을 제안한다. 이러한 방식은 기존의 호모다인방식에 비해 광학계 구성이 단순하고, 리니어 엔코더에서의 4채배 알고리즘이 그대로 이용될 수 있기 때문에 고속이송축의 변위를 검출하는 것이 가능하고, 4개의 위상신호를 동시에 얻기 때문에 광원의 세기변화에 대한 안정성이 높으며 또한 4버킷(4-bucket) 알고리즘으로 정밀한 위상검출이 가능하게 된다.

2. 간섭무늬 형성과 해석

본 연구에서는, 광의 파동성에 기인한 간섭현상을 이용하고, 여기서 형성된 직선줄무늬형태의 간섭무늬(interference fringe)에서 길이정보를 얻고 있으며, 광학적인 신호를 전기적인 신호로의 변환을 위해서 위상격자(phase grating)와 4분할 포토다이오드(quadratic photo-diode)를 사용하고 있다.

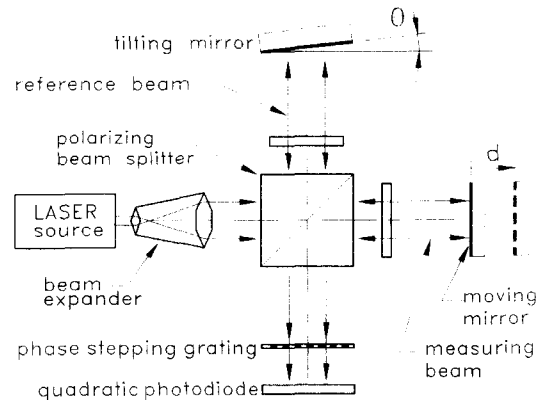


Fig. 1 The schematic of optical configuration

광학계 구성은 가간섭성(coherence)이 뛰어난 He-Ne 레이저를 광원으로 이용하면서 파동광학에 기초한 트위만그린 방식의 광위상 간섭계로서 Fig.1과 같다.

Fig.1에서 파장(wave length)이 λ 인 He-Ne 레이저광은 집광렌즈, 핀홀 그리고 집속렌즈를 거치면서 양질의 확장광으로 변화되고, 광분할기 (beam splitter)에 도달하여 두 부분으로 나뉘어 지게 된다. 분할된 광중에서 직선 성분, 즉 측정광(measuring beam)은 이동 거울(moving mirror)에 도달해 반사를 일으키고 되돌아오며, 광 분할기에 의해 반사된 광 성분, 즉 참조광(reference beam)은 경사 거울(tilting mirror)면에서 반사를 일으켜 되돌아 온다. 경사 거울과 이동 거울로부터 반사되어 돌아오는 광은 다시 광분할기에서 합쳐져서 위상격자(phase grating)에 가려져 있는 4분할 포토다이오드에 도달하게 된다. 포토다이오드에서는 두 거울의 상대 위치와 경사거울의 경사각에 따른 광경로차(optical path difference)에 의하여 직선 줄무늬형태의 간섭무늬(interference fringe)를 형성하게된다.

Fig. 2에서 보는 바와 같이 광축에 대해서 수직인 이동 거울에서 되돌아 오는 측정광(measuring beam)은 포토다이오드의 수광면과 평행한 파면(wave front)을 갖게되는 반면에 광축에 대해서 θ 만큼 기울어져 있는 경사 거울에서 되돌아오는 참조광(reference beam)은 측정광에 대해서 2θ 만큼 기울어 지게된다. 이 결과로 포토다이오드 위에는 일정한 피치(pitch, P)의 직선 줄무늬 형

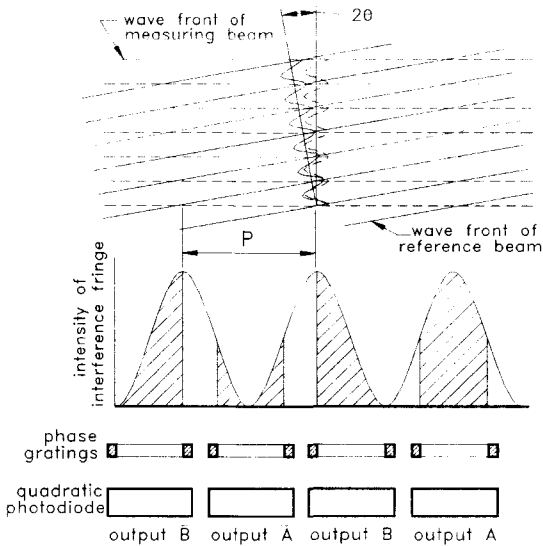


Fig. 2 Interference fringe and photo-diode

태의 간섭무늬가 발생되게 된다. 이때 형성되는 직선 줄무늬형태의 간섭무늬 피치 P는 경사거울의 각도 θ 와 광의 파장 λ 에 따라 결정되기 때문에 다음과 같은 관계를 가지게 된다.

$$P = \frac{\lambda}{2\theta} \quad (1)$$

여기서 간섭무늬의 한 피치 P를 2π 라고 할 때 4개의 위상격자가 $\pi/2$ 간격으로 놓여있기 때문에 4개의 포토다이오드의 출력신호는 각각 $\pi/2$ 간격의 위상차를 가지게 된다. 이들 신호를 각각 A, B, \bar{A}, \bar{B} 라고 하면, 이는 광학식 리니어 엔코더에서의 출력신호와 동일하게 된다.

Fig. 1에서와 같이 이동 거울이 d만큼 이동하면 측정광의 광경로(optical path)는 $2d$ 만큼 길어지게 되어서 Fig.2에서 측정광의 파면은 $2d$ 를 이동하게 된다. 이 결과로 포토다이오드상에 형성되어 있는 간섭무늬의 위상 이동량 ϕ 는 다음과 같이 정해진다.

$$\phi = 2\pi \cdot \frac{2d}{\lambda} \quad (2)$$

식(2)에서 이동 거울이 광원 파장의 $1/2$ 만큼 이

동할때마다 간섭무늬는 한 주기를 이동하게 됨을 알 수 있다. 결국 4개의 포토다이오드는 이동거울이 $\lambda/2$ 를 이동할때마다 1주기의 조화함수형태의 출력신호를 만들게 되고, 이들은 각각 $\pi/2$ 간격의 위상차를 가지게 된다. 이러한 4개의 출력신호는 기존의 광학식 리니어 엔코더(optical linear encoder)의 출력신호와 동일하게 되기 때문에 여기서 이용되고 있는 4채배(4-fold) 방식을 그대로 적용하면 간섭무늬 한 피치 P의 $1/4$ (이는 이동거울의 이동량 $\lambda/8$)에 해당하는 분해능과 방향 판별이 가능하게 된다.

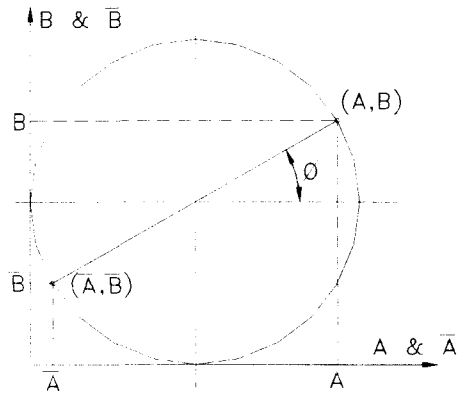


Fig. 3 Lissajous diagram of ideal phase signals

또한 4개의 포토다이오드출력은 각각 $\pi/2$ 간격의 위상차를 가지기 때문에 Fig.3에서 보는 바와 같이 A 와 B , 그리고 \bar{A} 와 \bar{B} 를 이용하여 리사주(Lissajous)를 그리면 여기서 위상 이동량 ϕ 은 다음과 같이 구해질 수 있기 때문에 좀더 정밀한 위치검출이 가능하게 된다.

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{B - \bar{B}}{A - \bar{A}}\right) \quad (3)$$

3. 실험

본 연구에서 제안하는 방식의 호모다인 레이저 간섭계(interferometer)에 대한 광학계를 구성하여 위상격자와 겹쳐진 4분할 포토다이오드 위에 간섭무늬를 형성시키고, 압전구동기(

piezoelectric actuator)를 이용하여 이동 거울을 이동시키면서, 포토다이오드의 출력신호와 이동 거울의 비소변위를 측정하는 갭센서(gap sensor)의 출력신호를 개인용 컴퓨터로 입력받아 식 비교해 보았다.

3.1 실험 장치의 구성

본 실험에서는 Fig. 1에 표시된 장치를 구성하였는데, 여기서는 파장 632.8nm의 He-Ne 레이저(5mW)에서 나온 광이 직경 20mm로 확대되어 광분할기로 입사되고, 분할된 두 개의 광은 각각 경사 거울과 이동 거울에서 반사되어 4분할 포토다이오

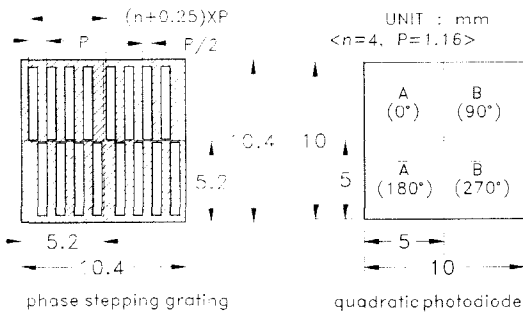


Fig. 4 Phase stepping grating and QPD

드로 입사하게 된다.

포토다이오드에서는 두 광의 경로차이로 인해서 간섭현상이 발생되는데 경사거울의 경사각도에 따라 다르게 되어 일정한 간격의 줄부너패턴을 형성시키게 된다. 포토다이오드 앞에 설치된 위상 격자는 위상이 다른 4개의 신호를 얻기 위해서 4개 영역으로 나누어져 있고, 각각은 1.16mm 피치로써 한 피치내에서 50% 구간은 투과되고, 나머지 50% 구간은 차단되도록 제작되었다.

여기서는 미세조정 나사기구를 사용하여 경사 거울의 각도를 조정하여 간섭무늬의 피치를 조절하였으며, 수광소자로 사용된 4분할 포토다이오드는 HAMAMATSU사의 S5106이다. 또한 이동 거울을 구동하고 이때 발생한 변위량을 측정하기 위해서 Fig. 5에서와 같이 판스프링 구조를 운동 안내면으로 사용하는 정밀 이송계가 구성되었는데, 미소구동을 위해서는 TOKIN사의 압전 구동기(piezoelectric actuator - AE0505D16)가 사용되었고, 미소변위 측정을 위해서는 ADE사의 정전용

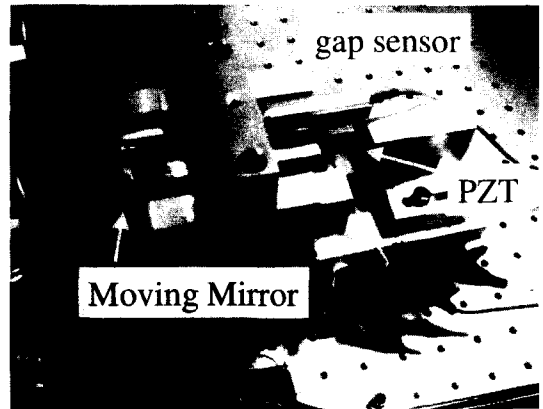


Fig. 5 Moving stage using PZT and leaf spring

량형 갭센서(ADE-2102)가 사용되었다.

3.2 실험 결과 및 고찰

Fig. 6는 정밀이송계의 압전구동기를 0.125V씩 증가시켜 100스텝(step)을 구동하고 다시 반대방향으로 50스텝을 구동할 때 4분할 포토 다이오드의 신호를 나타내고 있다.

압전구동기에 의해 1스텝당 약8.2nm씩 일정하게 구동함에 따라 4분할 포토 다이오드의 신호 A, B, \bar{A} 및 \bar{B} 가 위상이 각각 90도가 차이 나는 cosine함수 형태로 나타나고 있음을 볼 수 있다.

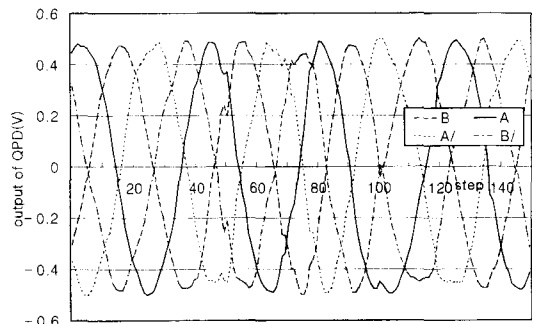


Fig. 6 Output of the quadratic photo-diode

신호 A와 \bar{A} 그리고 B와 \bar{B} 는 현재 일반적으로 사용되고 있는 광학식 선형 엔코더(optical linear encoder)에서의 출력신호와 동일하기 때

본에 엔코더에서의 4배(four-fold) 신호처리방식이 그대로 이용될 수 있다. 이들 4개의 출력신호는 각각 비교기에서 구형파로 변환되어 UP/DOWN 카운터(counter, LSI사의 LS7166)에 입력되는데, 카운터에서는 사용된 레이저 파장의 632.8nm이기 때문에 4배배되는데, 측정광의 광경로 변화는 이동거울 변위의 2배이기 때문에, 최종적으로는 이동거울의 변위가 레이저 파장의 1/8인 79.1nm마다 카운터값을 증가시키게된다. 그래서 UP/DOWN 카운터의 값에 79.1을 곱하면 이동거울의 변위를 알 수 있게된다. 이상의 과정을 거치면 Fig.7에서와 같은 결과를 얻게되는데, 수평축은 압전 구동기를 구동한 스텝수이고 수직축은 캡선서와 본 논문에서 제안된 레이저 간섭계에서 측정된 변위이다.

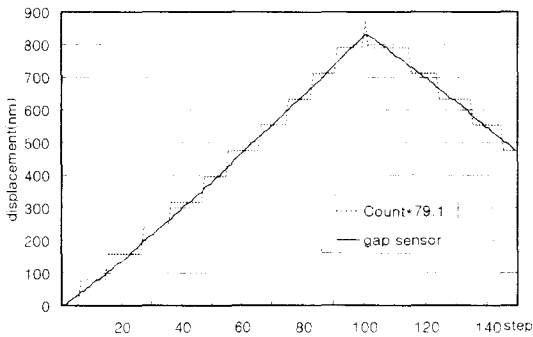


Fig. 7 Measured displacement with four-fold

Fig. 8은 신호 A 와 \bar{A} 그리고 B 와 \bar{B} 를 4버킷(four-bucket)에 관한 식(3)에 대입하여 구해진 위상 ϕ 값을 표시하고 있다.

Fig. 7에서는 광원 파장의 1/8에 해당하는

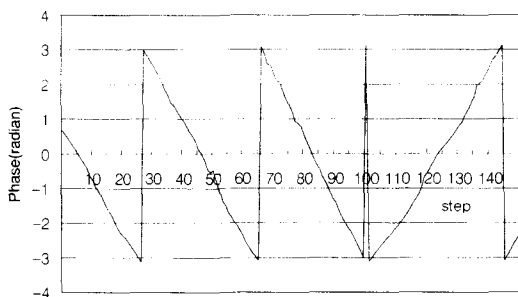


Fig. 8 Measured phase ϕ with four bucket

79.1nm의 분해능으로 위치검출을 하고 있는데, 이것은 Fig. 8에 표시되어 있는 간섭부드의 위상값 ϕ 을 이용하면 좀더 정밀한 위치검출이 가능해진다. 간섭부드의 위상값 ϕ 를 $\pi/2$ 로 나눈 나머지에 해당하는 변위값을 산출하여 UP/DOWN 카운터에서 검출된 변위값에 더하면, 이동 거울의 변위 d 는 다음과 같이 구해진다.

$$d = count \cdot \frac{\lambda}{8} + [\text{mod}(\frac{\phi}{\pi/2}) - \frac{\pi}{4}] \cdot \frac{\lambda}{4\pi} \quad (4)$$

Fig. 9는 압전구동기를 150스텝 구동할때 캡선서에서 측정된 변위와 본 연구에서 제안된 레이저 간섭계의 값을 비교한 것이다. 이 결과에 의하면 캡선서에 의한 측정값을 기준으로 할 때 본 연구에서 개발된 레이저 간섭계의 위치검출오차는 $\sigma = 5.653\text{nm}$ 로 나타났다.

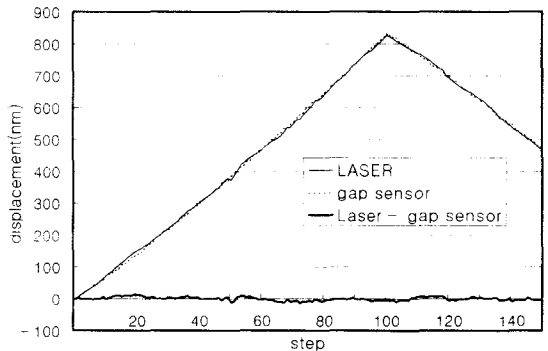


Fig. 9 Measured displacement and its accuracy

이상의 실험결과 분석으로부터 실험환경에서의 진동 혹은 소음의 영향으로 추측되는 흔들림이 나타나고 있음을 볼 수 있다. 따라서 광학계를 좀더 안정시켜서 4개 위상신호의 왜곡을 줄인다면 더 좋은 결과가 얻어질 수 있을 것으로 생각된다.

4. 결론

본 연구에서는 트위만그린 간섭계에 기초한 호모다인 레이저 간섭계를 구성하고, 참조 거울을 일정각도 기울여서 참조광의 파두면을 경사지게하여 측정광과의 간섭을 일으켰다. 이때 발생하는 직선

줄무늬 형태의 간섭무늬에서 $\pi/2$ 간격으로 4개의 위상을 측정하였으며, 이 위상신호를 4채배하여 79.1nm의 분해능을 얻었으며, 또한 4버킷 알고리즘을 적용하여 측정값의 정확도를 정전용량형 캡센서를 이용하여 검증한 결과 표준편차 5.653nm의 결과를 얻었다.

이상의 결과는 방진 및 방음에 대한 조치가 완벽하지 않은 상태에서 실험이 진행되었기 때문에 실험결과에 다소 오차가 있을 것으로 생각되며, 보다 안정된 실험환경이 구축된다면 향상된 결과가 얻어질 것으로 예상된다. 그리고 본 논문에서 제안하는 광학계는 현재 많이 사용되고 있는 헤테로다인(hetrodyne)형의 레이저 간섭계에 비하여 구조가 간단하여 저렴하게 구성될 수 있는 반면에 이동 거울이 운동중에 광축에 대하여 수직을 유지하지 않을 경우에 간섭무늬의 피치가 변하기 때문에 4개의 위상 신호가 왜곡되어 결국 위치검출에서의 오차요인이 될 수 있기 때문에 향후 이에 대한 지속적인 연구가 진행되어야 할 것이다.

후 기

본 연구는 과학재단의 특정기초 (장기) 연구과제의 지원으로 수행되었음. (과제번호: 98 - 0200 -11-01-5)

참고문헌

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. Richard, Baldwin and Graham J. Siddall, "A double pass attachment for the linear and plane mirror interferometer," SPIE, Vol.480, pp. 78-83, 1984.
4. 서호성 외, "정밀 길이측정용 레이저 주파수 안정화 및 특성평가," 표준연구원 내부보고서, 1993.

5. Shigeru Hosoe, "Highly precise and stable displacement-measuring laser interferometer with differential optical path," PRECISION ENG., Vol.17, pp. 258-265, 1995.
6. Norman Bobroff, "Residual errors in laser interferometry from air turbulence and nonlinearity," Applied Optics, Vol. 26, No. 13, 1987.
7. Chien-ming Wu and Ching-shen Su, "Non-linearity in measurements of length by optical interferometry," Meas. Sci. Tech., pp. 62-68, 1996.
8. Norman Bobroff, "Recent advances in displacement measuring interferometry," Meas. Sci. Tech., pp. 907-926, 1993.
9. C. R. Steinmetz, "Sub-micron position measurement and control on precision machine tools with laser interferometer," PRECISION ENG., Vol.12, No. 1, 1990.
10. W. Tyler Estler, "High accuracy displacement interferometry in air," Applied Optics, Vol. 32, pp. 808-815, 1985.
11. N.M. Oldham et al., "Electronic limitations in phase meters for heterodyne interferometry," PRECISION ENG., Vol. 35, pp. 173-179, 1993.
12. M. J. Downs and K.W. Raine, "An unmodulated bi-directional fringe-counting interferometer system for measuring displacement," PRECISION ENG., Vol. 24, pp. 85-88, 1979.
13. K.P.Birch, "Optical fringe subdivision with nanometric accuracy," PRECISION ENG., Vol. 55, pp. 195-198, 1990.
14. V. Greco, "Multiphase homodyne displacement sensor," Optik, Vol. 97 No. 1, pp. 15-18, 1994.
15. Peter L. M. Heydemann, "Determination and correction of quadrature fringe measurement errors in interferometers," APPLIED OPTICS, Vol. 20 No. 19, pp. 3382-3382, 1981.