

펨토초 레이저를 이용한 절대 거리 측정

Absolute distance measurement using Femtosecond laser

주기남, 김승우*

한국과학기술원 기계공학과

swk@kaist.ac.kr

1-D 거리측정을 위한 레이저 간섭계는 높은 분해능 (0.15 nm)을 가지며, 산업계에 많이 사용되고 있다. 그러나 이러한 레이저 간섭계는 변위 측정용 간섭계로서, 기준 미러에 대한 측정 미러의 움직이는 거리를 측정한다. 그렇기 때문에 고정된 위치의 거리는 측정이 불가능하며, 측정을 하더라도 2π 모호성을 가지기 때문에 측정영역이 매우 제한적이다. 이러한 문제를 등가파장 간섭계를 이용한 거리측정 (Synthetic wavelength interferometry), 주파수 변조된 광원(frequency modulated source)을 이용한 거리측정⁽¹⁾, 백색광을 이용한 주사 간섭계 (White-light scanning interferometry), 백색광의 주파수 분석을 이용한 간섭계 (Dispersive white-light spectrum interferometry)등이 제안되었다⁽²⁾. 그러나 이러한 방법들은 분해능이 매우 낮거나 ($>1\mu\text{m}$), 측정영역이 효과적으로 길지 못하다는 단점이 있다. 이러한 문제점을 극복하기 위해 등가파장 간섭계를 파장에 따라 여러 간섭계를 복합적으로 구성한 연구가 진행되었으며⁽³⁾, 또한 다른 두 간섭계를 복합적으로 구성한 연구도 진행되었다. 그러나 역시 시스템이 매우 복잡해 질 뿐더러 효과적으로 넓은 측정영역에서 높은 분해능으로 측정하지 못했다.

본 연구에서는 이러한 기존의 문제점을 해결하기 위해, 광원으로 펨토초 레이저를 사용하였다. 펨토초 레이저는 넓은 파장대역을 가지고 있으며 ($> 100 \text{ nm}$), 또한 펄스가 반복적으로 발진한다. 이러한 펨토초 레이저의 특징을 이용하면, 등가 파장 간섭계와 주파수 분석 간섭계가 동시에 가능하며, 복합 간섭계는 두 간섭계의 장점을 조합하여 넓은 측정영역에서 높은 분해능으로 측정이 가능하다.

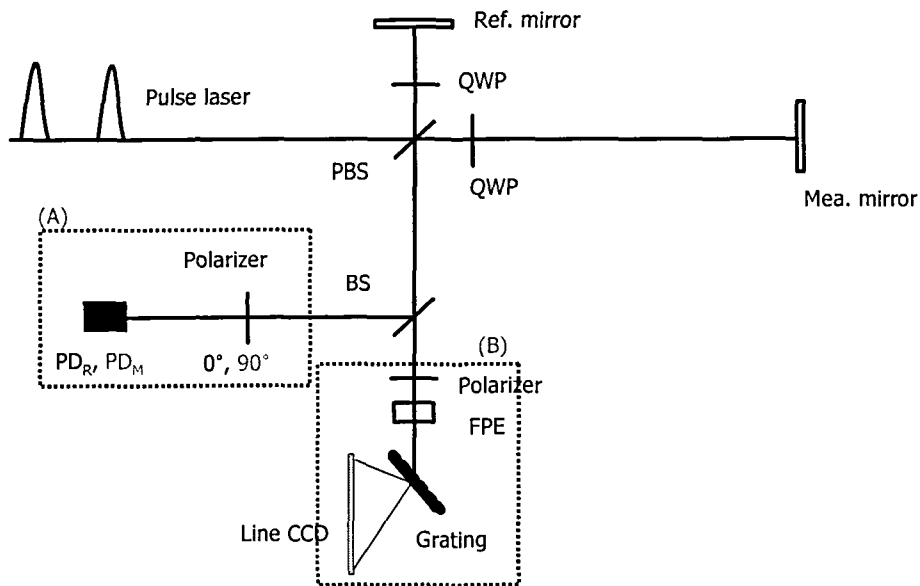


Fig. 1 Optical layout of Absolute distance interferometer using Femtosecond laser



Fig. 1은 제안한 간섭계의 광학적 구성을 보이고 있다. 간섭계는 간단한 마이켈슨 간섭계이며, 광원에서 출발한 빛은 편광 광분할기에서 기준 미러와 측정 미러로 나뉘게 된다. 각 미러를 반사하고 돌아온 빛은 다시 편광 광분할기를 지나 검출기 부분으로 들어오게 된다. 이 경우, 빛은 (A)와 (B)로 나누어 검출된다. (A) 부분은 등가파장 간섭계 부분이다. 펄스 레이저는 반복률 (repetition rate, f_r)을 가지고 있기 때문에 이는 곧 등가 파장으로 생각할 수 있다. 즉, 반복률을 이용하면 기준파와 측정파간의 위상을 측정하여 그 차이로 측정 미러의 위치를 측정할 수 있다. 펄스 레이저의 f_r 이 75 MHz이면 등가 파장은 2 m가 된다. 이를 전자적으로 분해하면 (1/1000), 2 mm의 분해능이 구현 가능하다. 그리고 펄스는 기본 주파수 75 MHz와 그의 고차 조화파로 나타낼 수 있으므로 전자적으로 필터링을 하여 10번째 조화파를 사용하면, 등가 파장은 0.2 m로 사용할 수 있으며, 이는 분해능을 0.2 mm까지 낼 수 있다⁽⁴⁾.

(B) 부분은 주파수 분석 간섭계를 나타낸다. 주파수 분석 간섭계는 주파수 별로 위상을 측정하여, 그 위상값들로 거리를 측정한다. 식 (1)은 고정된 위치에서의 위상과 주파수간의 관계를 나타낸다.

$$\Delta\phi = 2kL = \frac{4\pi}{\lambda}L = \frac{4\pi\nu}{c}L \quad (1)$$

L 은 측정 미러와 기준 미러 간의 거리를 의미하며, $\Delta\phi$ 는 위상차를, ν 는 레이저의 주파수를 의미한다. 식 (1)에서 알 수 있듯이 위상과 주파수 간의 선형 관계를 가지고 있으며, 이를 통해 거리를 계산해 낸다. Fig. 1에서 (B)부분으로 입사한 빛은 편광판을 통해 간섭을 일으키게 되며, 페브리 빼로 에탈론을 통과하여 주파수 필터링이 된다. 주파수 필터링을 하는 이유는 회절 격자를 지난 후에 빛을 검출하는 CCD 픽셀에 1개의 주파수 성분만 들어오게 하기 위함이다. 펄스 레이저는 레이저 모드가 무수히 많기 때문에, 이를 제한하여 원하고자 하는 주파수의 빛에서 위상을 측정해야 한다. 이렇게 해서 CCD에 보이는 간섭무늬는 주파수에 따른 위상 정보를 가지게 되며, FFT 신호 처리를 통해 위상을 측정하여, 거리를 측정하게 된다. 이러한 주파수 분석 간섭계는 신호 처리하는 과정에서 측정영역의 한계를 가지게 된다. 샘플링을 하는 동안 전체 파장 대역에서 위상 변화가 한 주기 이상 측정이 되어야 위상 정보를 얻을 수 있으며, 이는 측정영역의 최소 거리가 된다. 반대로 샘플링하는 주파수 ($\Delta\nu$)의 1/2보다 큰 주파수로 위상 변화가 나타나면, 이는 에일리어싱 (aliasing)이 발생하게 되어 2π 모호성을 가지게 된다. 그 보다 긴 거리는 측정이 가능하나 모호성을 가지게 된다. 즉, 모호성은 측정영역의 최대 거리에 영향을 주게 된다⁽⁵⁾. 최대 거리를 계산해 보면, 2 mm정도가 된다. 또한 분해능은 매우 우수하다. (< 1 μ m)

제안한 간섭계는 등가 파장 간섭계의 긴 영역과 주파수 분석 간섭계의 높은 분해능을 가질 수 있다. 등가 파장 간섭계의 분해능보다 작으므로, 등가 파장 간섭계는 주파수 분석 간섭계의 모호성을 해결해 줄 수 있다. 식 (2)는 제안한 간섭계의 원리를 보여준다⁽⁶⁾.

$$L = \text{int}\left(\frac{L_{syn}}{L_{max}}\right)L_{max} + L_{spec} \quad (2)$$

L_{syn} 은 등가 파장 간섭계로 측정한 거리, L_{spec} 은 주파수 분석 간섭계로 측정한 거리. L_{max} 는 주파수 분석 간섭계의 최대거리를 나타낸다.

현재 개념적인 구성이 끝난 상태이며 알고리즘 구성과 시스템을 구성하고 있다. 향후 시스템을 구성한 후 오차해석을 통해 오차를 보정할 예정이다.

Reference

1. "Sinusoidal-wavelength-scanning interferometer with double feedback control for real-time distance measurement," O. Sasaki, Appl. Opt., 2002
2. "Absolute distance measurement with synchronously sampled white-light channeled spectrum interferometry," U. Schnell, E. Zimmermann, R. Dandliker, Pure and Applied Optics, 1997
3. "MSTAR: a subnanometer absolute metrology system," O.P. Lay, S. Dubovitsky, opt. Lett., 2003
4. "High-accuracy measurement of 240-m distance in an optical tunnel by use of a compact femtosecond laser," K. Minoshima, H. Matsumoto, Appl. Opt., 2000
5. "Dispersive white light combined with a frequency-modulated continuous-wave interferometer for high-resolution absolute measurements of distance," L. Rovati, U. Minoni, F. Docchio, Opt. Lett., 1997