

점회절 구면파의 전단 간섭계를 이용한 절대위치 측정

주지영*(한국과학기술원 기계공학과), 김승우(한국과학기술원 기계공학과)

Absolute position measurement by lateral shearing interferometry of point-diffracted spherical waves

J. Chu(Mecha. Eng. Dept., KAIST), S. W. Kim(Mecha. Eng. Dept., KAIST)

ABSTRACT

The method measuring the absolute position of a point diffraction source emitting a spherical wavefront in three-dimension is proposed. Two-dimensional interference of spherical wavefronts is used to overcome ambiguity of phase order. The spherical wavefront is explicated by Taylor series expansion, from which a radius of curvature of a spherical wavefront and its center position in three-dimension are obtainable. The spherical wavefront is reconstructed by a modified lateral shearing interferometer, which uses single-mode fiber as a point diffraction source.

Key Words: Absolute distance (절대거리), Spherical wave (구면파), Zernike polynomial (Zernike 다항식), Lateral shearing interferometry (전단간섭계)

1. 서론

일반적으로 광간섭을 이용한 거리 측정 방법은 위상의 절대차수를 알 수 없기 때문에 측정 물체가 기준점에서 광축을 따라 이동할 때 간섭무늬 변화로 상대거리 즉 변위(displacement)를 측정하며 측정 중에 광이 끊어지면 측정된 거리값을 잃어버리는 문제가 있다. 측정물체의 이동 없이 거리를 재기 위한 절대거리 간섭계가 연구되어 왔으며 대표적으로 다파장 간섭계(multi-wavelength interferometer)[1]와 합성과 간섭계(synthetic wavelength interferometer)[2], 파장주사 간섭계(wavelength sweeping interferometer)[3] 등이 있다. 이밖에도 두 구면파의 간섭을 이용하는 방법도 제안[4]되었다. 하지만 이들 간섭계는 대충의 거리나 위상의 차수를 미리 알고 있어야 측정이 가능하며 위상의 차수로부터 절대적으로 자유롭진 못했다.

본 연구에서는 구면파의 전단 간섭을 이용하여 위상의 차수에 관계없이 구면파면의 중심까지의 절대거리와 중심의 절대위치를 측정하는 방법을 제안하고자 한다.

2. 구면파면의 근사

삼차원 공간상의 점광원 (x_c, y_c, z_c) 에서 전파된 구면파가 xy 평면상의 한점에서 생성하는 파면 W 는 식(1)과 같이 표현된다.

$$W(x, y) = \sqrt{(x_c - x)^2 + (y_c - y)^2 + z_c^2} + p \quad (1)$$

p 는 점광원에서의 초기 위상이고 Taylor series를 이용하여 식(1)을 3 차항까지 전개하면 다음과 같다.

$$W(x, y) = R\sqrt{1 + H} + p \approx R\left(1 + \frac{H}{2} - \frac{H^2}{8}\right) + p \quad (2)$$

$$\text{where } R = \sqrt{x_c^2 + y_c^2 + z_c^2}, H = \frac{-2x_c x - 2y_c y + x^2 + y^2}{R^2}$$

xy 다항식와 Zernike 다항식 사이의 관계를 이용하여 식(2)의 근사된 구면파면을 Zernike 다항식으로 변환[5]하면 그 계수들은 Table 1 과 같다. 각 계수들이 점광원까지의 거리 R 과 점광원의 삼차원 좌표 (x_c, y_c, z_c) 로 표현되고 그로부터 다음과 같이 거리와 점광원의 좌표를 구할 수 있다.

$$R = \frac{1}{4A_5 + 2\sqrt{A_4^2 + A_6^2}}$$

$$x_c = \text{sign}(A_6) \times \sqrt{R^2 - \frac{1}{4} - 2R^3(2A_5 - A_6)} \quad (3)$$

$$y_c = \text{sign}(A_6) \times \sqrt{R^2 - \frac{1}{4} - 2R^3(2A_5 + A_6)}$$

$$z_c = \sqrt{R^2 - x_c^2 - y_c^2}$$

따라서 구면파면의 형상정보를 알면 구면파면까지의 거리와 중심위치를 구할 수 있다.

3. 전단 간섭계 구성 및 실험

구면파면은 단일모드 광섬유를 점광원으로 사용하는 전단간섭계(lateral shearing interferometry)[6]를 응

Table 1 Zernike coefficients for a spherical wavefront in terms of its source coordinates

Zernike coefficients		Meaning
A_1	$p + R + \frac{1}{4R} - \frac{1}{24R^3} - \frac{x_c^2}{8R^3} - \frac{y_c^2}{8R^3}$	Constant term
A_2	$-\frac{x_c}{R} + \frac{x_c}{3R^3}$	Tilt about y axis
A_3	$-\frac{y_c}{R} + \frac{y_c}{3R^3}$	Tilt about x axis
A_4	$-\frac{x_c y_c}{2R^3}$	Astigmatism with axis at $\pm 45^\circ$
A_5	$\frac{1}{4R} - \frac{1}{16R^3} - \frac{x_c^2}{8R^3} - \frac{y_c^2}{8R^3}$	Defocus
A_6	$\frac{x_c^2}{4R^3} - \frac{y_c^2}{4R^3}$	Astigmatism with axis at 0° or 90°
A_8	$\frac{x_c}{6R^3}$	Third-order coma along x-axis
A_9	$\frac{y_c}{6R^3}$	Third-order coma along y-axis
A_{13}	$-\frac{1}{48R^3}$	Third-order spherical aberration

용하여 구할 수 있다. Fig. 1 과 같이 광섬유를 마름모 형태로 놓아 대각방향의 광섬유에서 전파되는 구면파끼리 간섭시키면 서로 수직인 두개의 간섭무늬를 얻을 수 있고 Rimmer-Wyant 방법을 사용하여 파면을 복원할 수 있다. 복원되는 파면은 4 개의 광섬유의 중심위치, 즉 타겟 중심에서 전파되는 구면파면이며 식(3)을 이용하여 타겟중심까지의 절대거리와 절대위치를 간섭무늬의 위상에 관계없이 구할 수 있다. 광원으로 파장이 633 nm 인 He-Ne 레이저 2 대를 사용하고 각각의 레이저에서 나온 광은 광섬유로 입사하여 광섬유 분할기(fiber coupler)에서 50:50 으로 두 개의 광섬유로 나뉘지고 대각선 방향으로 놓인 두 개의 페룰에 삽입되도록 했다. 광섬유 분할기에서 나뉘진 두 개의 광섬유 중 하나는 반경 방향으로 늘어나는 PZT 에 감아서 위상천이(phase-shifting)가 가능하도록 했다. 간섭무늬는 CCD 로 측정하며 시스템의 좌표계는 Fig. 1 과 같이 CCD 의 중심에 놓여 있다. 각 방향으로 전단 거리는 각각 2 mm 씩이다.

측정 결과는 Fig. 2 와 같다. 타겟을 CCD 상의 좌표계에 대해 x, y 방향으로 30 mm 위치에 두고 z 축을 따라 0.1 m 간격으로 움직이며 측정했다. R과 z_c 는 0.1 m 간격으로 비슷하게 증가하고 반복능은 20 μm 이하였다. y_c 는 타겟의 이동에 상관없이 30 mm 정도로 일정하고 x_c 는 증가하는 형태를 보이는데 이것은 타겟의 구동축과 CCD의 z축이 일치하지 않아서 생긴 것이다. 이들의 반복능은 250 μm 이하

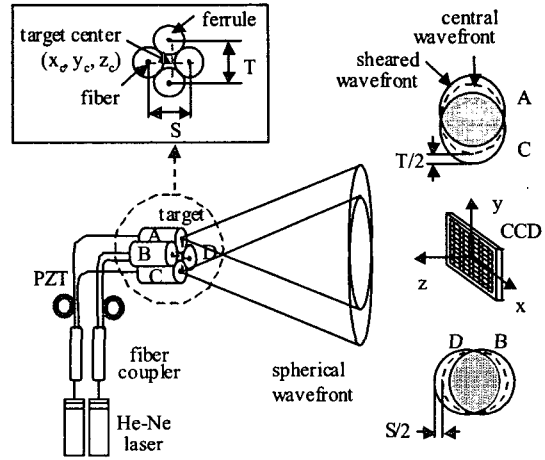


Fig. 1 Schematic diagram of modified lateral shearing interferometer to measure absolute distance and position.

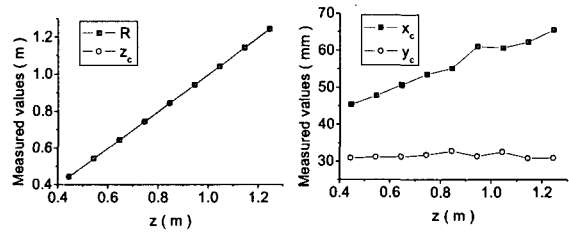


Fig. 2 Measurement results of target moving along z-axis

로 R과 z_c 의 경우보다 나쁜데 이것은 x_c , y_c 가 R의 오차에 민감하기 때문이다.

4. 결론

본 연구에서는 전단 간섭계에서 복원된 구면파의 형상정보와 구면파면의 특징을 이용하여 측정물체까지의 절대거리와 절대위치를 측정하는 방법을 제안했다. 실험을 통해 제안된 방법이 타당함을 검증했다.

참고문헌

1. F. Bien, M. Camac, H. J. Caulfield, and S. Ezekiel, *Appl. Opt.*, 20(3), 400-403 (1981)
2. René Dändliker, Kurt Hug, Jacob Politch and Eric Zimmermann, *Opt. Eng.*, 34(8), 2407-2412 (1995)
3. Hisao Kikuta, Koichi Iwata and Ryo Nagata, *Appl. Opt.*, 25(17), 2976-2980 (1986)
4. Hyug-Gyo Rhee, Seung-Woo Kim, *Appl. Opt.*, 41(28), 5921-5928 (2002)
5. Daniel Malacara, *Optical Shop Testing*, 2nd ed. (John Wiley & Sons, Inc., New York, 1992), Chap. 4, 13