Optical Society of Korea Summer Meeting 2005 (7.14~15, 2005)

부피 간섭계를 이용한 삼차원 절대 위치 추정

Absolute three-dimensional position estimation using the volumetric interferometer

주지영, 김승우
한국과학기술원 기계공학과
chjy@kaist.ac.kr

지금까지 서로 직교하는 측정축 없이 삼차원 공간상에서 프로브의 좌표를 구하려는 여러 연구가 있었다. 3 대 이상의 레이저 간섭계로 프로브까지의 거리를 측정해 삼차원 좌표를 구하거나 프로브까지의 거리와 회전 각도를 이용하여 구하는 방법 등이 있었다. 하지만 이러한 방법들은 회전구동부가 필요하며 한 위치에 대해 상대적인 좌표만 구할 수 있다. 한편 구면파의 간섭을 이용하여 회전구동부 없이 삼차원 공간상에서 절대 좌표를 구할 수 있는 부피 간섭계가 제안되었다. 하지만 이 방법의 경우 좌표 계산시 비선형 최적화 과정과 초기 가정치가 필요하고 측정 영역이 좁은 문제점이 있었다. 본 연구에서는 부피 간섭계에서 비선형 최적화와 초기 가정치 없이 대략적으로 프로브의 삼차원 절대 위치를 구할 수 있는 계산 방법을 제안하고 프로브와 CCD 사이의 z방향 거리가 1 m 정도인 경우에 성능을 평가해 보았다.

부피 간섭계는 구면파의 간섭을 이용하여 프로브의 삼차원 절대좌표를 구한다. Fig. 1과 같이 프로브에는 단일모드 광섬유 두개를 나란히 위치시켜 광섬유 끝단에서 나오는 구면파끼리 간섭을 시키고 충분히 떨어진 거리에서 CCD를 이용하여 간섭무늬를 관측한다. 2x2 커플러에서 나누어져 나온 두 개의 광섬유는 반경 방향으로 늘어나는 PZT 주위에 감겨있어 PZT를 구동하여 위상천이를 시킨다. 기준 좌표계는 CCD 중심에 위치하고 CCD에서 위상천이 된 간섭무늬를 측정하여 위상천이 알고리즘을 이용해 각 픽셀에서의 위상을 구한다.

CCD의 p번째 픽셀에서 위상값을 전파상수 k(=2π/λ)로 나눈 값은 다음과 같다.

$$\Phi^p/k=\sqrt{(x_1-x^p)^2+(y_1-y^p)^2+z_1^2}-\sqrt{(x_1+dx-x^p)^2+(y_1+dy-y^p)^2+(z_1+dz)^2}+\Delta\phi/k$$

식(1)

여기서 x_1, y_1, z_1 은 프로브의 한쪽 광섬유 위치, dx, dy, dz 는 한쪽 광섬유와 이웃한 광섬유 사이의 거리, x^p, y^p 는 CCD의 p번째 픽셀 위치, Δφ는 프로브의 두 광섬유 끝단에서의 위상차이다. 식(1)을 살펴보면 프로브의 광섬유 좌표가 제곱근 안에 존재한다. 프로브와 CCD 사이 거리가 충분히 떨어져 있으므로 2차 binomial series를 이용하여 식(1)을 전개하고 x^p, y^p 에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$\Phi^p/k\approx\left(\frac{1}{2R_1}-\frac{1}{2R_2}\right)x^{p^2}+\left(\frac{1}{2R_1}-\frac{1}{2R_2}\right)y^{p^2}+\left(\frac{dx}{R_2}-\frac{x_1}{R_1}+\frac{x_1}{R_2}\right)x^p+\left(\frac{dy}{R_2}-\frac{y_1}{R_1}+\frac{y_1}{R_2}\right)y^p+C \qquad \text{식(2)}$$

$$\text{where}\quad R_1=\sqrt{x_1^2+y_1^2+z_1^2}\ ,\quad R_2=\sqrt{(x_1+dx)^2+(y_1+dy)^2+(z_1+dz)^2}$$

C는 x^p, y^p 에 관계되지 않는 상수항이다. 프로브에서 수직 방향으로 광섬유가 배치된 경우 $dx\approx 0, dy\approx 125\mu m$ 이고 수평으로 배치된 경우 $dx\approx 125\mu m, dy\approx 0$ 의 관계가 성립된다.

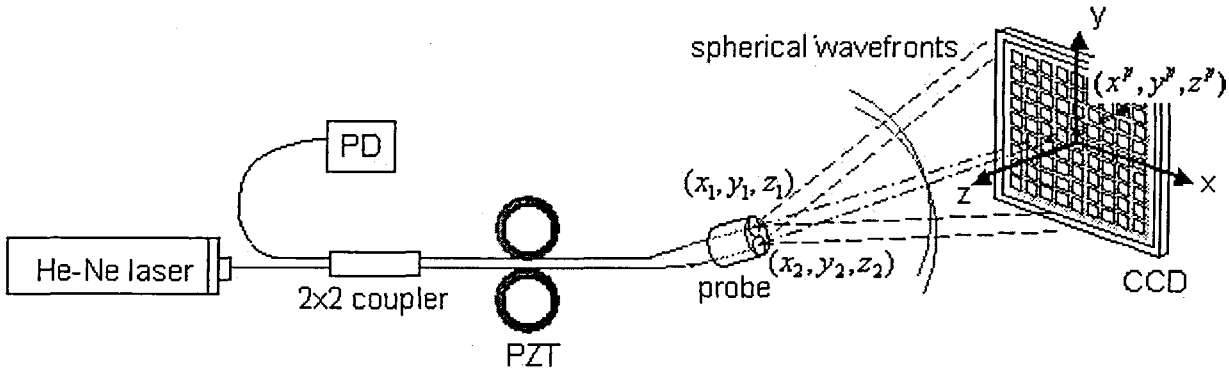

Fig. 1 Configuration of the volumetric interferometer

한편 실험에서 구한 위상을 다음과 같이 다항 맞춤할 수 있다.

$$\Phi_e^p/k \approx a_1 x^{p^2} + a_2 y^{p^2} + a_3 x^p + a_4 y^p + C_e \qquad \text{식(3)}$$

식(2)와 식(3)에서 수직 방향으로 광섬유가 배치된 경우 x^{p^2} 과 x^p 의 계수에서 x_1을 구할 수 있고 수평 방향으로 광섬유가 배치된 경우 y^{p^2} 과 y^p 의 계수에서 y_1을 구할 수 있다. x_1, y_1 을 구하면 계수들의 관계에서 R_1과 R_2를 구할 수 있고 따라서 z_1을 구할 수 있다. 이상적인 경우 z축 방향으로 1 m 거리에서 x, y가 -100 mm ~ 100 mm 사이를 움직일 때 절대 좌표의 측정오차는 3 mm 이하이며 특히 z는 1 mm 이하의 오차를 가진다. z가 클수록 x, y가 작을수록 측정오차는 줄어들지만 거리가 멀수록 임의오차가 커져 z 값에는 어느 정도 측정영역의 한계가 존재한다.

CCD와 프로브의 z 방향 거리가 약 1 m 일 때 프로브의 x 위치를 -60 mm ~ 80 mm로 이동시키면서 삼차원 위치를 측정한 결과는 Fig. 2와 같다. z 방향 거리는 약 1.07 m로 측정되었으며 CCD의 좌표계 축과 프로브의 구동축이 일치하지 않아서 프로브의 이동에 따라 x, y, z 측정값이 일정한 경향을 보이면서 변하였다. 각 지점 사이의 이동거리를 살펴보면 몇몇 오차가 큰 지점을 제외하고는 프로브의 이동거리인 20 mm와 비슷하게 나왔다.

본 연구에서는 CCD상에서 구면파에 의해 생성된 간섭무늬의 위상 분포를 픽셀 좌표에 대해 binomial series로 전개한 식과 다항 맞춤한 식의 계수를 비교하여 프로브의 삼차원 절대 좌표를 구하는 방법을 제시하였다. 프로브의 광섬유를 x, y 방향으로 배치하여 각각 측정한 위상에서 프로브의 삼차원 절대좌표를 구할 수 있다. 초기 가정치와 비선형 최적화 과정이 필요하던 예전의 계산 방식에 비해 간단히 좌표를 구할 수 있으며 측정영역을 넓힐 수 있는 장점이 있다. 반면 정확도와 반복능이 떨어지므로 대영역에서 대략적인 삼차원 절대좌표의 위치를 구하는데 응용할 수 있다.

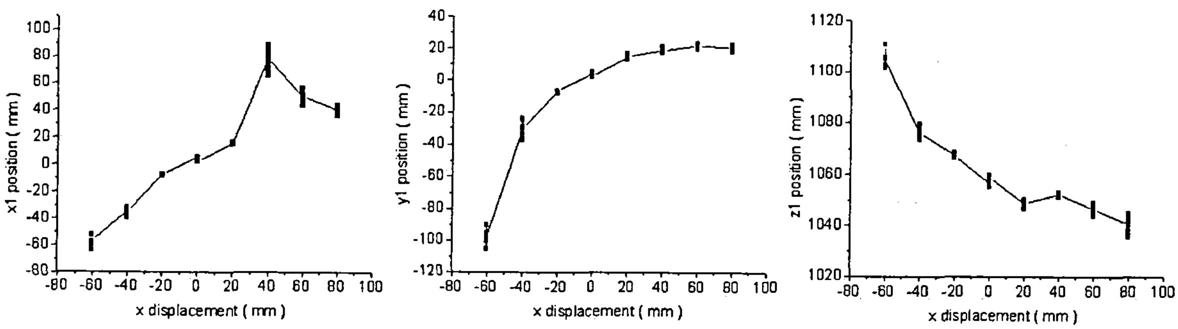

Fig. 2 Estimated absolute three-dimensional position of the probe