

펨토초 레이저를 이용한 부피 간섭계

Volumetric interferometer using femtosecond laser

진중환, 김영진, 김승우

한국과학기술원 기계공학과 BUPE연구단

jinjong@kaist.ac.kr

물체의 위치 및 형상 정보를 얻기 위한 측정은 접촉식, 비접촉식의 다양한 방법으로 수행되어지고 있다. 그 중에서 CMM(Coordinate Measuring Machine)은 상대적으로 큰 물체의 3차원 좌표 정보를 접촉식으로 얻는 대표적인 방법이며, 이는 광학 스케일이나 헤테로다인 레이저 간섭계를 이용해서 x, y, z 축의 좌표를 얻는다. 이러한 3차원 좌표 정보를 얻는 경우 측정 정밀도에 가장 큰 영향을 주는 요인은 그림 1과 같이 측정하고자 하는 축과 측정하는 축 사이의 거리로 인해 생기는 아베 오차(Abbe's error)⁽¹⁾이다. 이때 아베 오차는 측정하는 영역이 커질수록 그에 비례하여 커지게 되며, 대영역을 정밀하게 측정해야 할 인공위성용 광학계나 천문대용 대형 렌즈나 미러 등에는 아베 오차가 더욱 커지게 된다. 이러한 단점을 근본적으로 극복하기 위해 KAIST에서는 그림 2와 같이 두 개의 이웃한 단일모드 광섬유를 이용하여 프로브의 위치를 직접 측정하는 부피 간섭계(Volumetric interferometer)를 제안했다.^{(2),(3)} 부피 간섭계는 두 개의 이웃한 단일모드 광섬유를 측정 프로브에 장착하고, 광검출기 배열의 픽셀(pixel)에 도달하는 두 구면파의 간섭무늬의 위상(phase)정보를 알아내어 광섬유로부터 발생하는 두 구면파의 간섭으로부터 구면파 중심, 즉 프로브의 3차원 좌표를 얻는다. 이때, 부피 간섭계는 위상정보를 얻기 위해 위상천이(phase shifting) 알고리즘을 사용하였다. 이를 통해 얻어지는 전체 불확도(uncertainty)는 640 픽셀 X 480 픽셀 CCD를 사용한 경우, x 방향으로 420 nm, y 방향으로 550 nm, z 방향으로 9.7 nm 이다.

부피간섭계는 측정원리에 있어 3축을 동시에 측정함으로써 아베 오차를 최소화하는 장점이 있지만 위상천이와 CCD를 이용하기 때문에 생기는 측정 속도의 한계, 광원의 제한된 광량과 광파이버의 개구(N.A.)로 인한 측정영역의 한계, 압전소자와 CCD의 비선형성에 의한 오차 등을 가진다. 이러한 부피 간섭계의 성능을 개선시키기 위하여, 다중 CCD를 사용하여 측정영역을 넓히는 연구가 진행되고 있으며⁽⁴⁾, 헤테로다인 방법을 이용하여 측정시간이 긴 위상천이부를 제거함으로써 실시간으로 좌표값을 얻어내는 헤테로다인 부피간섭계⁽⁵⁾에 대한 연구도 진행되고 있다.

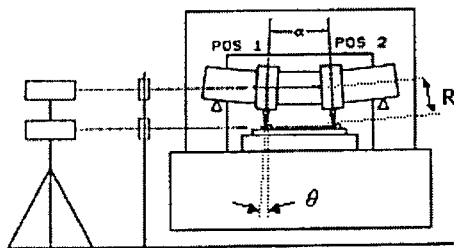


그림 1. 아베 오차

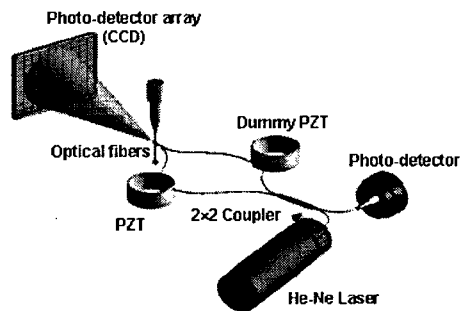


그림 2. 일반적인 부피 간섭계의 구성

본 논문에서는 기존의 부피간섭계의 개념을 이용하여, 불확도가 다른 두 축보다 상대적으로 좋은 광축방향(Z)의 측정영역을 넓히는 3축 절대거리 간섭계의 구성을 제안하고자 한다. 기존의 He-Ne 레이저 광원을 높은 출력을 갖는 펨토초 레이저로 대체함으로써 구면파로 전파해 나간 빛을 검출기로 검출할 수 있는 영역이 넓어지며, 이에 따라 넓은 측정영역을 확보할 수 있다. 그리고 기존의 부피 간섭계에서



는 단색광을 이용함으로써 발생하는 간섭무늬가 연속적이므로 2π -모호성의 문제가 생기며 비선형 최적화를 통해서 좌표를 구하였다. 하지만, 펄스 레이저의 경우에는 mode-lock된 넓은 대역폭을 갖는 파장이 동시에 발진하여 마치 백색광 간섭계와 같이 저주파수의 envelope에 고주파 성분이 포함되어 있는 간섭무늬 얻게 된다. 이를 위상천이하여 해석함으로써 기존의 복잡한 측정 알고리즘을 좀 더 간단히 적용할 수 있을 것으로 예상된다.

구성은 일반적인 부피 간섭계의 구성을 따르고 있으며, 그림 3과 같이 구성되었다. 우선 펄스 레이저에서 나온 펄스는 광속분할기(BS1)를 거쳐 두 개의 빛으로 나뉘게 된다. 반사되어 꺾어진 빛은 다른 광속분할기(BS2)를 거쳐게 되고 그 중 하나는 PD로 들어가게 기준 위상을 측정하는데 사용되며, 나머지 하나는 대물렌즈에 의해 집광되어 광섬유로 입사하게 된다. 처음의 광속분할기(BS1)을 통과한 빛은 위상천이를 위해 구동 가능한 미러들(M2,M3)을 거쳐 대물렌즈에 의해 집광되어 광섬유로 입사하게 된다. 이는 일반적인 부피 간섭계의 구성과 유사하며, 링(ring)형태의 PZT를 통해 광섬유를 늘려서 구현하던 위상천이방법에서 기계적으로 미세하게 조정 가능한 위상천이방법으로 대체했다. 그리고 구면파를 발생시키기 위한 점 회절부를 구현하기 위하여 광섬유를 사용하였다. 여기서, 일반적으로 사용되는 핀홀(pin-hole)의 지름이 $10\ \mu\text{m}$ 이상임을 고려하면, 단일모드 광섬유 코아(core)의 지름은 $2\sim 3\ \mu\text{m}$ 이므로 우수한 구면파를 얻을 수 있으며, 광의 진행방향에 수직하게 절단된 단일모드(single mode) 광섬유 끝단에서 출발한 레이저 광은 완벽에 가까운 구면파로 볼 수 있다. 그리고, 점회절을 위해 사용한 파이버의 길이를 최소화함으로써, 분산(dispersion)효과를 최소화 할 수 있다.

기존의 부피 간섭계에서 비선형 최적화를 수행하기 위해서는 초기치 선정이 중요한 문제였으나, 본 구성에서는 기준이 되는 PD와 검출부인 PD-array 사이의 위상차에 synthetic wavelength 개념을 적용하여, 초기치를 실험적으로 대략 선정할 수 있으며, PD-array에서 얻어지는 펄스 레이저의 간섭무늬와 대략적으로 선정된 초기치를 적용하여 해석함으로써 우리가 원하는 물체의 3차원 좌표를 얻을 수 있다.

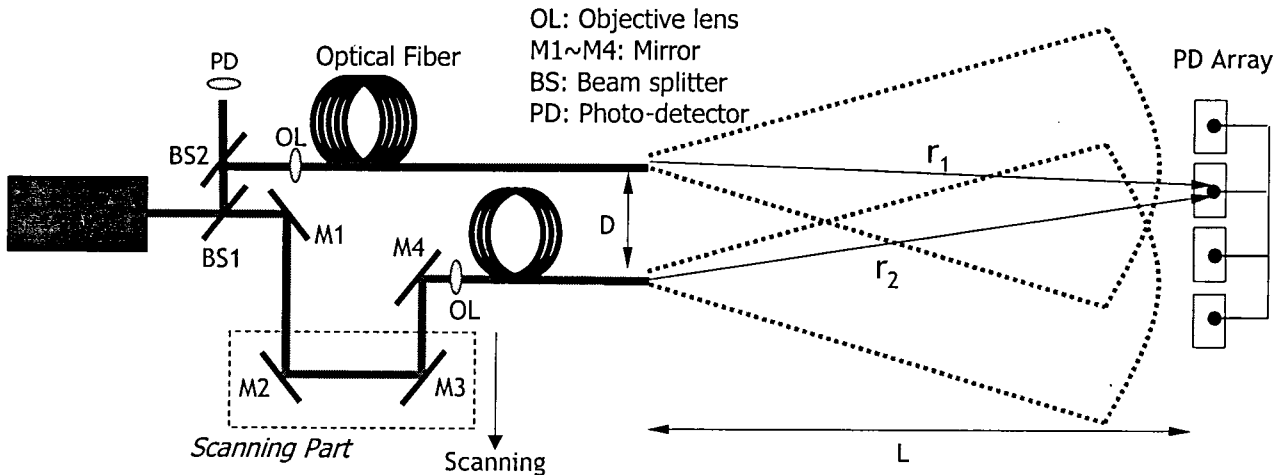


그림 3 펄스 레이저를 이용한 부피간섭계의 구성

1. Bryan, J.B., "Design and Construction of an Ultra-Precision 84 inch Diamond Turning Machine", Precision Engineering, Vol. 1, No. 1, pp. 13-18, 1979
2. Rhee, Hyug-Gyo, Kim, Seung-Woo, "Absolute distance measurement by two-point diffraction interferometry", Applied Optics, Vol. 41, No. 28, pp. 5921-5928, 2002.
3. Kim, Seung-Woo 外, "Volumetric Phase-Measuring Interferometer for Three-Dimensional Coordinate Metrology", Prec. Eng., Vol. 27, No. 2, pp. 205-215, 2003.
4. 주지영, 이혁교, 김승우, "다중 CCD를 이용한 부피간섭계의 성능개선", 춘계 한국정밀공학회 학술대회, 2003
5. 김영진, 김승우, "헤테로다인 기법을 이용한 부피 간섭계", 춘계 한국정밀공학회 학술대회, 2004