

다중 CCD 를 이용한 부피 간섭계의 성능 개선

주지영*(KAIST 대학원 기계공학과), 이혁교, 김승우(KAIST 기계공학과)

The performance improvement of the volumetric interferometer with multi-CCDs

J. Y. Chu(Mechanical Eng. Dept., KAIST), H. G. Rhee, S. W. Kim(Mechanical Eng. Dept., KAIST)

ABSTRACT

The Volumetric Interferometer using two spherical wavefronts emitted from the ends of two single mode fibers has been suggested to measure 3-dimensional absolute coordinates. In this paper, we try to improve the performance of the volumetric interferometer using multi-CCDs. We get coordinates matching matrixes between CCDs and can obtain more information in the space with multi-CCDs. Also we find out the best arrangement of multi-CCDs by computer simulations. In the simulation we can know that it will be better to increase the distance between CCDs to improve performance. For the performance test, we do a repeatability test, a comparison test with 2-D stage and the self-calibration using artifact.

Key Words : 3D coordinates measurement(삼차원 측정), Volumetric interferometer(부피 간섭계), Multi-CCD(다중 CCD), CMM(Coordinate measuring machine)

1. 서론

삼차원 공간에서 2π -모호성(2π -ambiguity)의 제약을 받지 않고 절대거리, 혹은 절대좌표를 측정하는 방법에 대해서 그간 많은 연구가 이루어져왔다. 간섭계를 이용한 방법으로는 경사조사(Grazing incidence) 간섭계^[1], 2 파장(Two-wavelength) 간섭계^[2], 백색광 간섭계^[3] 등이 있다. 하지만 이 간섭계들은 현재 산업계에서 요구하고 있는 수백 mm 공간에서 1 mm 이하의 정밀도로 측정하기엔 부리가 있다. 다중파장(Multiple-wavelength) 간섭계^[4]의 경우 가장 부합되는 성능을 보이고 있지만, 아직 일반적인 헤테로 다인(Heterodyne) 간섭계가 갖는 정밀도에 미치지 못하고 있다. 또 다른 방법으로, 절대거리를 직접 측정하지는 않지만 기하학적 모델을 이용해 절대거리를 계산하는 멀티래더레이션(multilateration)도 현재 연구중이다^[5].

삼차원 공간에서 절대거리를 측정하는 방법으로, 부피 간섭계(Volumetric interferometer)가 제안되었다^[6,7]. 이 간섭계는 Fig. 1 과 같이 공간상의 (x_1, y_1, z_1) 과 (x_2, y_2, z_2) 좌표에 위치한 두개의 단일모드 광섬유를 이용해서 구면파를 발생시키며, 광검출기 배열(Photo-detector array)에서 측정한 두 구면파의 간

섭무늬로부터 위상천이 알고리즘을 통해 광 위상을 구한다. 이 위상 정보에는 두 구면파의 중심좌표 (x_1, y_1, z_1) 과 (x_2, y_2, z_2) 에 대한 정보가 포함되어 있으므로, 비선형 최적화 방법을 통해 공간상의 좌표를 구할 수 있다^[7].

기존의 부피 간섭계에서는 광검출기로 하나의 CCD 를 사용하여 공간상의 정보가 제한되어 z 축에 비해 x, y 축의 반복능이 좋지 않은 문제점이 있었다. 이에 본 연구에서는 여러 개의 CCD 를 사용하여 부피 간섭계의 측정영역을 넓혀 x, y 축의 반

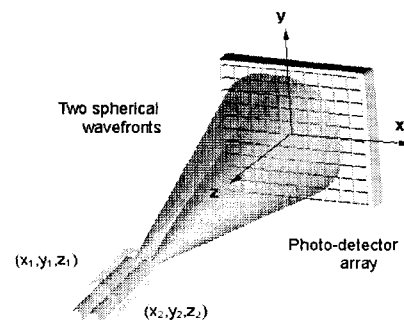


Fig. 1 Coordinates relationship of the volumetric interferometer

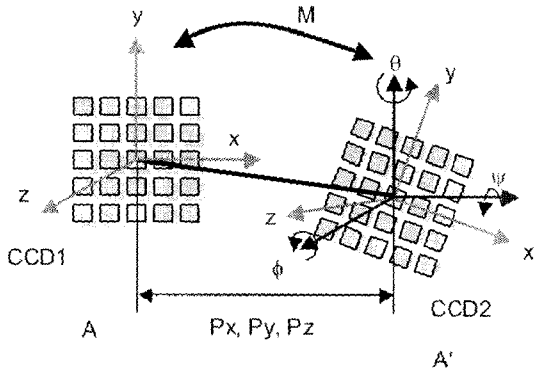


Fig. 2 Relationship between 2 CCD's coordinates and transfer matrix

복능을 향상시켰다. 또한 2 차원 스테이지와 비교실험 및 자가보정(self-calibration)을 수행하였다.

2. 다중 CCD의 좌표계 매칭과 배치

2.1 CCD의 좌표계 매칭

부피 간섭계에서 좌표계의 기준은 CCD의 중심에 존재한다. 여러 개의 CCD를 사용할 경우 이들 CCD에 각각의 좌표계가 존재하게 되어 이것을 기준 좌표계에 대해 통일시킬 필요가 있다. 기준 CCD에 대해 다른 CCD까지의 거리와 회전각도를 알면 각 CCD의 좌표계는 하나로 통일시킬 수 있다. Fig. 2와 같이 두 CCD의 좌표계 사이에는 병진(translation) 성분 P_x, P_y, P_z 와 각 축에 대한 회전(rotation) 성분 ϕ, θ, ψ 로 총 6개의 변수가 존재한다. 이 변수들을 구해내기 위해 각 CCD에서 측정된 광원의 좌표를 이용할 수 있다.

Fig. 2에서 CCD 1을 기준 CCD로 잡고 CCD 1과 CCD 2에서 측정된 광원의 (x, y, z) 좌표를 A와 A'라 하면 두 CCD의 좌표계 사이의 변환 행렬 M은 다음과 같이 표현된다.

$$A' = MA \quad \text{식 (1)}$$

변환 행렬 M은 병진 성분과 회전 성분으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$M = \begin{pmatrix} f(\phi, \theta, \psi) & P_x \\ & P_y \\ & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

행렬 M에는 변수가 6개 존재하지만 실제적으로

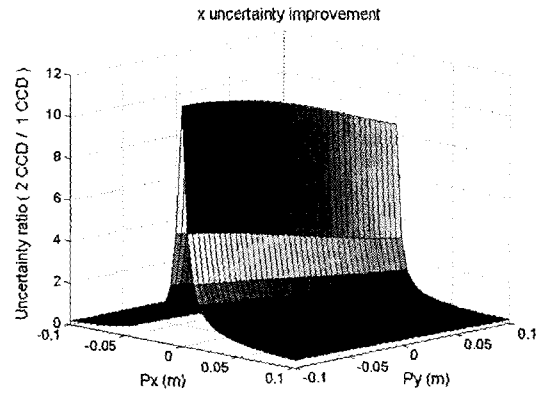


Fig. 3 x uncertainty improvement of volumetric interferometer with 2 CCDs

로 M의 각 성분값이 중요한 뿐 P_x, P_y, P_z 와 ϕ, θ, ψ 자체를 구할 필요는 없다. 그러므로 M을 구하기 위해서는 적어도 서로 다른 3점 이상에서의 광원의 측정좌표가 있으면 식(1)을 이용하여 변환 행렬 M을 구할 수 있다.

변환 행렬 M을 구하면 기준 CCD 외의 CCD의 픽셀 위치를 기준 CCD에 대해 나타낼 수 있으며 각 위치에서 간섭부너 정보를 얻게 된다.

2.2 CCD 배치에 대한 시뮬레이션

다중 CCD 사용시 부피 간섭계의 좌표측정 결과가 가장 좋아지는 최적의 CCD 배치 상태를 시뮬레이션을 통하여 구했다.

CCD를 한 개 사용했을 때 부피 간섭계로 구한 측정좌표의 상대불확도에서, CCD 각 픽셀의 위치와 개수 등 CCD 오차에 의한 영향은 상대불확도의 오차요인 중에서 약 1.4%를 차지한다. 이 값은 x, y, z 좌표값에 대해 거의 비슷하다. 여러 개의 CCD를 사용했을 때도 이 비율이 비슷하다고 가정하고, 기

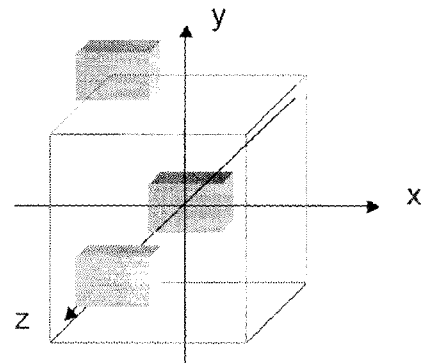


Fig. 4 The best arrangement of 3 CCDs

준 CCD 에 대해 다른 CCD 의 위치를 xy, yz, zx 각 평면상에서 변화시키면서, 한 개의 CCD 를 사용했을 경우에 대한 두 개의 CCD 를 사용했을 경우의 상대불확도 비를 구하였다. Fig. 3 은 CCD 가 xy 평면상을 움직일 때 x 좌표의 상대불확도 비를 보여준다. CCD 가 x 방향으로 많이 떨어질수록 x 의 상대불확도가 현저히 좋아지는 것을 볼 수 있다. 이러한 결과에서 상대불확도 비가 가장 작아지는, 즉 측정결과가 가장 좋아지는 CCD 의 위치를 구했다. 그 다음 두 개의 CCD 를 최적의 배치상태에 놓고 세 번째 CCD 의 위치를 변화시켜가면서 위의 과정을 반복했다. Fig. 4 는 세 개의 CCD 를 사용했을 때 최적의 배치 상태를 보여준다.

시뮬레이션을 통해 대체로 기준 CCD 에 대해 나머지 CCD 들이 x, y, z 방향으로 떨어질수록 불확도가 향상됨을 확인할 수 있었다. 이것은 물리적으로도 공간상의 정보량이 늘어나기 때문에 불확도가 좋아짐을 예측할 수 있다.

시뮬레이션에서는 여러 오차 요인들을 고려하였으며 그 중 다중의 CCD 를 사용함으로써 생기는 CCD 사이의 좌표 매칭(coordinates matching)에서 병진오차(translation error)가 불확도에 크게 영향을 미침을 확인하였다. 회전오차(rotation error)의 경우 별 영향이 없었다. Fig. 3 의 결과는 각 CCD 에서 픽셀 사이의 간격 에러가 10 nm, 각 CCD 좌표계 사이의 매칭 에러(matching error) 중 병진오차(translation error)가 100 μm , 회전오차(rotation error)가 0.1° 인 경우이다.

3. 실험장치 구성 및 실험결과

3.1 실험장치 구성

다중 CCD 를 이용한 부피 간섭계의 실험장치를 다음과 같이 구성하였다. 구면파의 광원이 되는 광

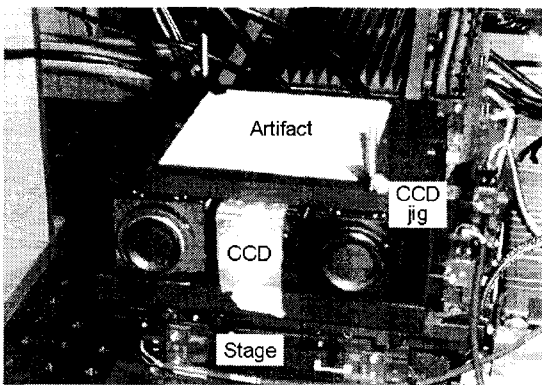


Fig. 5 Experiment setup of volumetric interferometer with multi-CCD

섬유 끝단은 고정시키고 CCD 는 wire-bonder 용으로 개발된 2 차원 스테이지에 장착하여 위치 변화가 가능하게 하였다. 스테이지 위에 CCD 고정용 지그를 설치하여 여기에 CCD 3 개를 고정시켰다. 시뮬레이션으로 구한 최적의 CCD 배치 상태는 Fig. 4 와 같지만 실제로 이러한 배치는 하기 힘들고 또 CCD 사이의 진동을 고려하여 3 개의 CCD 를 일렬로 정렬한 상태로 실험장치를 구성하였다. 좌표계의 중심은 중앙 CCD 의 중심으로 잡았으며 CCD 사이의 x 방향 간격은 49 mm 이다. 광원은 기준 CCD 에서 z 축으로 약 300 mm 떨어진 곳에 위치시켰다. Fig. 5 는 스테이지 위에 장착된 지그와 CCD 를 보여준다.

3.2 실험결과

다중 CCD 를 가진 부피 간섭계의 성능검사를 위해서 반복능 실험, 2 차원 스테이지 위치와의 비교 실험, 자가 보정을 수행하였다.

3.2.1 반복능 실험

CCD 가 장착된 스테이지를 x 축, z 축 방향으로 구동시키면서 부피 간섭계의 측정좌표의 반복능을 구해보았다. 그 결과 한 개의 CCD 를 사용했을 경우보다 x 반복능이 향상됨을 확인할 수 있었다. y 와 z 반복능은 별로 좋아지지 않았는데 이러한 결과는 물리적인 예측과도 일치한다. 즉, CCD 를 x 축 방향으로 늘어놓음으로써 x 축 방향으로 공간상의 정보량이 늘어났지만 y, z 방향으로는 공간상의 늘어난 정보가 없기 때문에 x 의 반복능만 향상된 것이다.

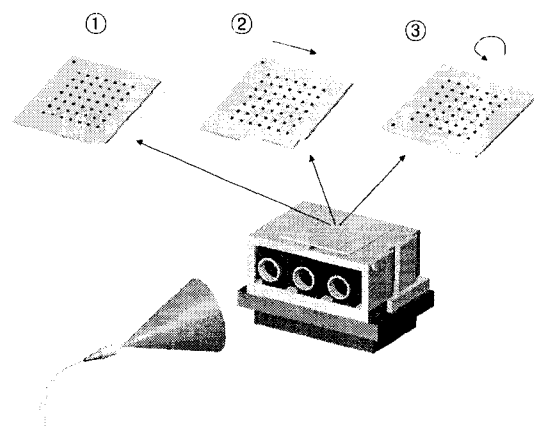


Fig. 6 Self-calibration for volumetric interferometer with artifact. (J. Ye's algorithm)

3.2.2 스테이지와의 비교 실험

스테이지를 일정간격으로 움직이면서 스테이지의 구동량과 부피 간섭계의 측정결과를 비교하여 두 값 사이에 얼마만큼의 차이가 있는지 구해보았다.

3.2.2 자가보정 실험

CCD 를 고정된 지그 위에 10 mm 간격 7×7 로 마크가 새겨진 표준시편을 놓고 스테이지를 구동하면서 부피 간섭계의 측정결과와 시편의 각 마크의 위치측정 결과를 이용하여 스테이지와 부피간섭계의 자가보정을 수행하였다. 자가보정을 통해 스테이지와 부피 간섭계에서 정렬 오차 등을 제외하고 계통오차(systematic error)만을 뽑아내어 각 측정 시스템의 성능을 확인할 수 있다. 시편의 각 마크를 처음에 한번, 병진 이동시켜서 한번, 90° 회전시켜서 한번 측정하여 총 3 번의 측정을 통해 얻은 데이터를 J. Ye 의 자가보정 알고리즘을 이용하여 계통오차를 구하였다.^[6]

4. 결론

삼차원 공간상에서 절대좌표를 측정하는 부피 간섭계의 성능을 향상시키기 위해 다중의 CCD 를 사용하였다. 공간상의 정보량이 늘어날수록 반복능이 향상됨을 알 수 있었다. 그리고 다른 측정기와 비교를 위해 2 차원 스테이지와의 비교 실험을 수행하였으며 부피 간섭계만의 계통오차를 구하기 위해 자가보정을 수행하였다.

후 기

본 연구는 창의적연구진흥사업의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. P. de Groot, "Grating interferometer for flatness testing," *Opt. Lett.*, Vol. 21, No. 3, pp. 228-230, 1996.
2. Z. Sodnik, E. Fischer, T. Ittner, and H. J. Tiziani, "Two-wavelength double heterodyne interferometry using a matched grating technique," *Appl. Opt.*, Vol. 30, No. 22, pp. 3139-3144, 1991.
3. T. Li, A. Wang, K. Merphy, and R. Claus, "White-light scanning fiber Michelson interferometer for absolute position-distance measurement," *Opt. Lett.*, Vol. 20, No. 7, pp. 785-787, 1995.
4. H. Kikuta, K. Iwata, and R. Nagata, "Distance

measurement by the wavelength shift of laser diode light," *Appl. Opt.*, Vol. 25, No. 17, pp. 2976-2980, 1986.

5. O. Nakamura, M. Goto, K. Toyoda, Y. Tanimura, and T. Kurosawa, "Development of a coordinate measuring system with tracking laser interferometer," *Annals of CIRP*, Vol. 40, No. 1, pp. 523-526, 1991.
6. S. W. Kim, "New Design of Precision CMM based upon Volumetric Phase-Measuring Interferometry," *Annals of CIRP*, Vol. 51, No. 1, pp. 357-360, 2001.
7. H.G. Rhee, and S.W. Kim, "Absolute distance measurement by two-point diffraction interferometry," *Appl. Opt.*, accepted(Issue date : Oct. 1, 2002).
8. J. Ye, M. Takac, C. N. Berglund, G. Owen, and R. F. Pease, "An exact algorithm for self-calibration of two-dimensional precision metrology stages," *Prec. Eng.*, Vol. 20, No. 1, pp. 16-32, 1997.