멀티레터레이션법을 이용한 절대간섭계의 점광원 위치 결정법

Position Determination Using Multi-lateration Method

김 병 창*
(Byoung-Chang Kim)

Abstract : A CCD camera is used to determine the position of the point sources that influence the measurement accuracy in the absolute interferometer. The principle of determination method is based on the GPS in which the position is determined by more than 3 distance information from the known positions. Two-dimensional array of photo-detectors in the CCD camera is used as known positions. Performing optimization of the cost function constructed with phase values measured at each pixel on the CCD camera, the position coordinates of each source is precisely determined.

Keywords : multi-lateration, CCD camera, point source, position determination, GPS, absolute interferometer

I. 서론

절대좌표계로 구성된 공간상에 존재하는 특정점의 좌표값을 신뢰성 있게 결정하는 문제는 인류의 오랜 역사에 그 기원을 두며 발전하여왔다. 별자리와 태양으로부터의 각도를 측정하여 항해 중인 배의 위치를 결정했던 시대에서부터 1980년대 후반에 소개된 삼차원 측정기(CMM: Coordinate Measuring Machine)에 이르러서는 수 미터의 체적 내에서 마이크로 오차를 가지고 위치를 결정할 수 있게 되었다[1].

1990년대 초반 GOTO는 3축의 직교좌표축을 따라 구동되는 기존 삼차원 측정기에서 발생하는 아베오차, 코사인오차, 구동오차를 극복하기 위한 방법으로 멀티레터레이션(Multi-lateration)법을 소개하였다[2-4]. 이는 1960년대 초반 미국방성에 의해 군사목적으로 개발되었던 위성항법시스템(GPS: Global Positioning System)의 원리[5]를 이용해 삼차원 측정기 끝 단에 부착된 프루브의 위치를 결정하였는데, 이는 그림 1과 같이 공간 임의의 한 점의 위치를 결정하기 위해, 위치를 알고 있는 최소 3개의 임의의 점(station)으로부터 측정점까지의 거리를 측정하고, 이들 거리들을 이용하여 측정점의 삼차원 위치를 결정하는 원리에 근거한다.

멀티레터레이션법은 2000년대초 NPL(National Physics Laboratory)에 의해 개발된 삼차원 측정기에 적용되기도 하였으며[1], 2003년 본 저자에 의해 수십만 측정 좌표값을 한꺼번에 획득하는 방법인 점광원 절대간섭계로 응용되기도 하였다[6]. 이는 광섬유(optical fiber) 끝단에서 구면광으로 발산하는 점광원을 사용함으로써 측정 대상을 기존의 한 점 측정에서 면적으로 확대하였으며, 측정점과 광원과의 거리 정보를 획득하기 위해서 이웃하는 두 점광원을 광원부로 채택하여 측정대상물의 표면에 발생하는 두 점광원의 간섭무늬를 해석함으로써 실현하였다.

점광원 절대간섭계는 광섬유를 통해 쉽게 획득할 수 있는 고정밀의 구면광을 기준광으로 사용함으로써[7], 기존의 멀티레터레이션 측정 시스템에서 발생하는 여러 문제점들이 제거되는 장점을 가진다. 반면 점회절 절대간섭계를 이용하여 정밀하고 신뢰성 있는 측정을 위해서는 공간상에 존재하는 기준점(station)인 점광원의 위치가 우선적으로 신뢰성 있게 결정되어야 한다. GPS에서 좌표의 기준이 되는 인공위성의 좌표를 최초에 어떻게 결정하느냐는 문제와 동일한 맥을 가지고 접근되어야 한다.

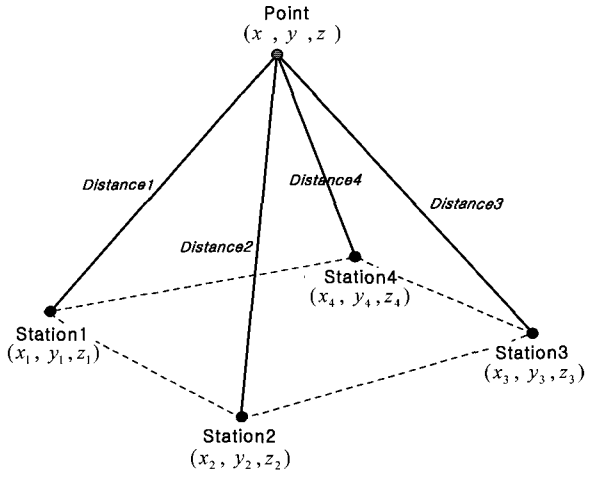


그림 1. GPS 작동원리.
Fig. 1. Principle of GPS.

본 연구에서는 점광원 절대간섭계의 시스템 변수로 정의되는, 공간상에 존재하는 기준점(station)인 점광원의 위치를 정밀하게 결정하는 방법으로써 CCD카메라를 이용한 또 다른 멀티레터레이션 방법을 제시하며, 실험을 통해 신뢰성을 검증하고자 한다.

II. 점광원 절대간섭계의 작동원리

멀티레터레이션법을 응용한 점광원 절대간섭계는 그림 2과 같이 이웃하는 한쌍의 점광원을 광원부로 하는 3개 이상의 광원부와 간섭무늬 획득을 위한 카메라로 구성된다[6]. 이웃하는 두 점광원으로부터 발생되는 두 구면광은 서로 간섭하여 측정물체 표면에 광원부 순서에 따라 순차적으로 간섭무늬를 형성한다. 이때 CCD카메라를 통해 관측되는 간섭무늬를 해석하여 광원부로부터 측정점까지의 거리정보를 획득

* 책임저자(Corresponding Author)
논문접수 : 2006. 4. 28., 채택확정 : 2006. 6. 10.
김병창 : 경남대학교 기계자동화공학부(bckim@kyungnam.ac.kr)
※ 본 연구는 2006학년도 경남대학교 학술연구장려금 지원으로 이루어졌음.

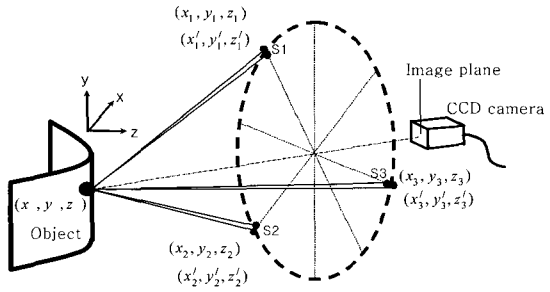


그림 2. 절대간섭계의 시스템 구성도.
Fig. 2. System configuration of absolute interferometer.

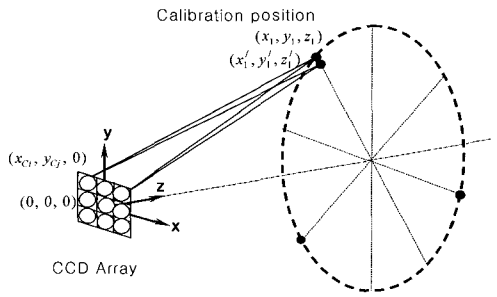


그림 3. 카메라를 이용한 점광원 위치결정법.
Fig. 3. Position determination method using CCD camera.

한다. GPS의 좌표결정법에 따라 측정점의 좌표는 3개 이상의 광원부로부터 각각 획득되는 거리정보를 획득하면 결정될 수 있다.

위치가 알려진 광원부 내의 두 점광원의 좌표가 $(x_i,\ y_i,\ z_i)$ $(x_i',\ y_i',\ z_i')$ i = 1, 2, 3이고, 측정점의 좌표가 $(x,\ y,\ z)$ 일 때 측정점에서 획득되는 위상은 다음과 같이 표현된다.

$$\Phi_i = k\left[\sqrt{(x-x_i)^2+(y-y_i)^2+(z-z_i)^2} - \sqrt{(x-x_i')^2+(z-z_i')^2+(z-z_i')^2}\right] \quad (1)$$
$$i = 1, 2, 3.$$

여기에서 i는 광원부의 순서이며, k는 전파상수(propagation coefficient)이다. 3개의 미지수를 가지는 한 점의 측정 좌표값 (x, y, z)은 각각 다른 3개의 점광원을 이용한 위상식들로부터 결정될 수 있다. (1)의 해를 구하는 과정에서 널리 알려진 Newton Rapshon등과 같은 수치해석을 적용하게 된다. (1)에서 측정 좌표값(x, y, z)를 제외한 점광원의 위치 좌표값 $(x_i,\ y_i,\ z_i)$, $(x_i',\ y_i',\ z_i')$ i = 1, 2, 3는 절대간섭계의 구성 단계에서 선행되어 결정되어야 할 시스템변수로써, 본 논문에서는 공간상에 존재하는 점광원의 공간위치 좌표를 결정하는 방법을 제안하고자 한다.

III. CCD 를 이용한 점광원 위치 결정법

현재 광범위하게 사용되고 있는 GPS는 지구 주위를 비행하는 위치가 잘 알려진 인공위성으로부터 지상의 현 위치까지의 거리정보를 획득함으로써 위치를 결정한다. GPS 또한 점광원 절대간섭계와 마찬가지로 초기 기준 인공위성의 좌표를 설정해 주어야 하는 문제가 발생되었다. GPS용 인공위성의 위치는 SLR (Satellite Laser Ranging)을 이용하여 좌표를 보정하는데, 이는 지상에 존재하는 위치가 잘 알려진 3개 이상의 기준점(station)에서 고출력 레이저를 송출하여 비행중인 대상 인공위성에서 반사되어 돌아온 신호로부터 거리를 측정함으로써 대상물의 위치를 결정하는 방법이다. GPS법과 SLR법은 상호 반대개념이나 동일한 위치결정법에 기초하고 있다.

공간에 존재하는 점광원 절대간섭계의 점광원 좌표점 $(x_i,\ y_i,\ z_i)$, $(x_i',\ y_i',\ z_i')$ 을 결정하기 위해서는 위치 정보가 알려진 6개 이상의 지점에서 각각의 점광원까지의 거리를 측정할 필요가 대두된다. 이는 그림 3에서 보여지는 바와 같이 결상광학계가 제거된 CCD를 사용한 멀티레터레이션법을 적용함으로써 실현 가능하다.

CCD는 평면 위에 640×480개의 화소(pixel)가 일정 간격으로 위치한 잘 보정된 기준을 제공하므로, 일단 CCD평면 위에 절대좌표계의 원점을 설정하면 이웃하는 화소들의 좌표값(x_{ci}, y_{cj})들이 화소간 거리(pitch: s_x, s_y)와 순서(index: i, j)의 곱으로 간단히 정의된다. 반면 결정하고자 하는 점광원부 내의 두 점광원의 좌표값은 6개의 변수 $(x_i,\ y_i,\ z_i)$, $(x_i',\ y_i',\ z_i')$ 로 표현되므로 CCD평면의 640×480개의 화소로부터 획득되는 거리정보를 최적화하는 6개의 변수를 결정할 수 있다. CCD 각 화소에서 획득되는 거리정보는 두 점광원에서 발산된 두 구면광의 간섭에 의해 생성되는 위상식으로 정의되며 수식 (2)와 같이 표현된다.

$$\Phi_{ij} - \Phi_0 = k\,[\,r_{ij} - r_{ij}' - r_0 + r_0'\,] \quad (2)$$

Where $r_{ij} = \sqrt{(x_1 - x_{Ci})^2 + (y_1 - y_{Cj})^2 + (z_1)^2}$,

$r_{ij}' = \sqrt{(x_1' - x_{Ci})^2 + (y_1' - y_{Cj})^2 + (z_1')^2}$

$r_0 = \sqrt{(x_1)^2 + (y_1)^2 + (z_1)^2}$,

$r_0' = \sqrt{(x_1')^2 + (y_1')^2 + (z_1')^2}$

$i = 1,\ldots,640 \quad j = 1,\ldots,480$

여기에서 Φ_{ij} 와 Φ_0 는 CCD의 (i,j)번째 화소와 원점에서 각각 획득된 위상값이며, k는 전파상수, (x_{ci}, y_{cj})는 CCD 각 화소들의 좌표값을 나타낸다. (2)에서 절대좌표계 원점에서 획득되는 위상값(Φ_0)과 원점으로부터 두 점광원간의 거리차 $(r_0 - r_0')$ 를 각각 양변에서 뺀 이유는 두 점광원 간에 존재하는 초기 위상의 차이를 상쇄시키기 위해서이다[8]. 6개의 미지수를 결정하기 위해 CCD의 모든 화소에서 획득되는 정보를 이용하여 수식 3과 같이 오차함수를 구성하였다.

$$E(x_1, y_1, z_1, x_1', y_1', z_1') = \sum_{i=1,\ j=1}^{640,\ 480} [\Phi_{ij} - \Phi_0 - k(r_{ij} - r_{ij}' - r_0 + r_0')] \quad (3)$$

(3)을 최적화하는 6개의 변수를 구하기 위한 방법으로 많은 방법들이 알려져 있으나, 시스템 변수 보정은 단 일회 행

해지며, 오차함수가 국소 최소값(local mininum)을 상당수 가지고 있음을 고려하여 시간이 오래 걸리지만 신뢰성 있는 최적값(global mininum)을 제시하는 유전자 알고리즘(genetic algorithm)을 이용하였다[9].

IV. 점광원 위치 결정법 검증

1. 점광원 위치 오차의 영향

먼저 본 논문에서 결정하고자 하는 점광원의 위치좌표가 전체 측정결과에 미치는 영향을 관찰하기 위해 점광원의 위치를 그림 4와 같이 6자유도의 운동으로 정의하여 해석하였다. 점광원의 6자유도는 광원부의 병진운동(T_x, T_y, T_z) 3개, 두 점광원간의 상대거리(d) 1개, 광원부의 중심으로부터 절대 좌표계의 원점을 향하는 광축을 중심으로 회전하는 롤운동(roll motion) 1개, 그리고 광축과 두 점광원간의 거리방향에 수직인 축을 중심으로 회전하는 요운동(yaw motion)로 규정되며, 6개의 자유도를 통해 두 점광원의 모든 위치오차를 정의할 수 있다. 이들 점광원의 위치 오차가 측정결과에 미치는 영향을 관찰하기 위해서 그림에서와 같이 절대좌표의 원점 주위로 존재하는 공간에 가상 평면(virtual plane)을 설정하였다.

가상 평면은 점광원의 위치오차에 따라 왜곡되어져 복원되는데, 왜곡의 정도를 통해 시스템 변수 오차가 측정결과에 미치는 영향을 살펴볼 수 있다. 그림 5(a)는 3개의 점광원부에 각각 요운동의 각도 오차가 1° 삽입되었을 때 가상평면이 왜곡된 형상이다. 90mm×90mm 영역의 가상평면을 고려하였으며, 수치모사(simulation)를 실시한 결과, 왜곡의 정도가 최대(peak-to-valley)값으로 5mm로 나타났다. 점광원부의 롤운동에 대한 경우도 그림 5(a)와 동일한 경향을 가지며, 그림 5(b), 그림 5(c)는 각각 점광원간 상대거리에 10μm 거리오차를, 그리고 모든 운동에 오차를 삽입 하였을 경우 가상평면의 왜곡 정도를 각각 나타낸다. 가상평면의 왜곡 정도는 각 운동의 오차량에 따라 변화하므로, 수치모사를 통한 왜곡 현상은 각각의 오차에 따른 경향성만을 대표한다고 하겠다. 따라서 GPS 좌표결정법을 기초로 하는 점광원 절대간섭계의 경우 공간상에 존재하는 점광원의 좌표값 결정이 측정 정밀도에 중요한 영향을 줌을 알 수 있다.

2. 점광원 위치 결정법 검증실험

점광원의 위치 결정법을 검증하기 위한 방법으로 잘 알려진 기준면을 선택하여 점광원의 위치결정 전후의 측정결과

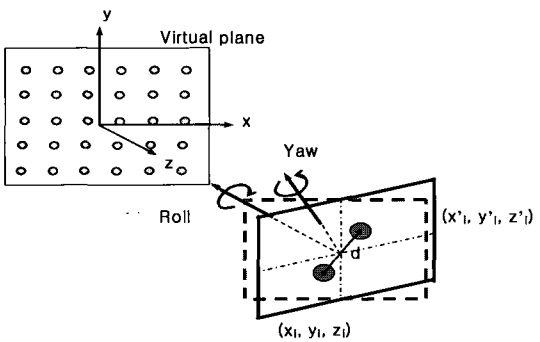
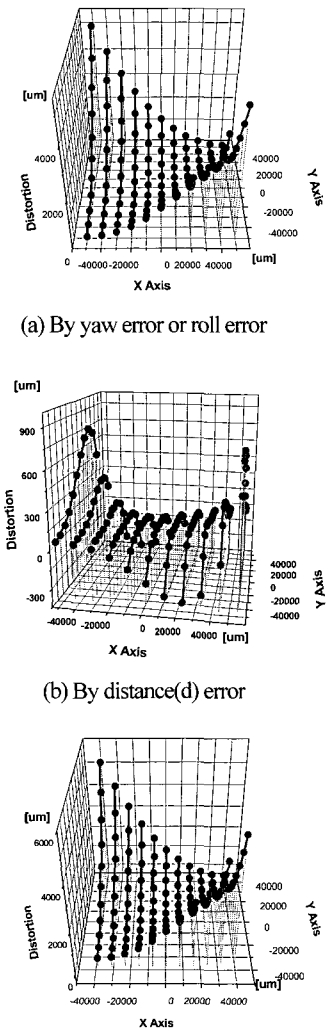


그림 4. 점광원부의 6자유도 위치오차 모델.
Fig. 4. 6DOF position error model of point sources.



(a) By yaw error or roll error

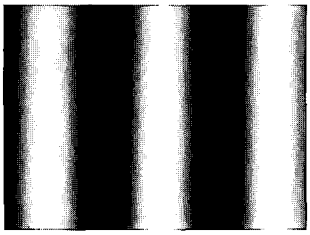
(b) By distance(d) error

(c) By combined 6 errors

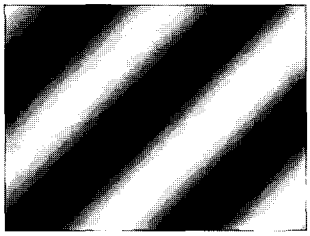
그림 5. 점광원부 위치오차에 따른 가상면의 왜곡현상.
Fig. 5. Distorted virtual plane by each error.

를 비교하는 방법을 선택하였으며, 검증을 위한 기준평면으로써 CCD카메라의 촬상면을 기준면으로 사용하였다. 즉, 그림 2에서 결상면(image plane)에 위치한 카메라를 결상광학계를 제거한 다음 물체면(object plane)에 두면 카메라의 촬상면의 형상이 측정이 되므로 검증을 위한 이상적인 기준면이 된다. 이는 그림 2에서 CCD카메라 전단부에 부착된 결상광학계를 통해서 물체면의 모든 정보가 결상면으로 이동되는 광학이론에 근거한다. 검증을 위해 사용한 기준면인 CCD촬상면은 Zygo사의 피조간섭계(fizeau interferometer)를 이용해 측정한 결과 평면도(flatness)가 최고(PV) 463nm로 나타났으며, 이는 점광원 위치결정법의 검증 기준면으로 적합하다고 판단된다. 두 점광원에서 각각 발산된 구면광이 간섭(interference)하여 CCD촬상면에 생성되는 간섭무늬는 점광원부의 위치와 두 점광원의 자세에 따라 각각 그림 6와 같이 나타난다.

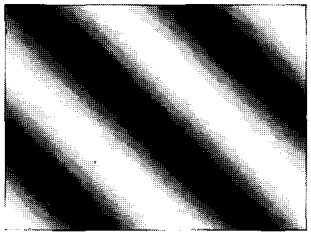
획득된 간섭무늬을 해석하여 CCD촬상면의 형상을 복원한 결과, 3절에서 행한 점광원의 위치 결정법을 적용한 후의 결과가 적용 전의 결과에 비해 급격히 향상됨을 비교그림 그림 7에서 알 수 있다. 즉, 그림 5에서 확인한 바와 같이 점광원



(a) By point source 1



(b) By point source 2



(c) By point source 3

그림 6. 각 점광원부에 의해 발생된 간섭무늬.
Fig. 6. Interference fringes by each point source.

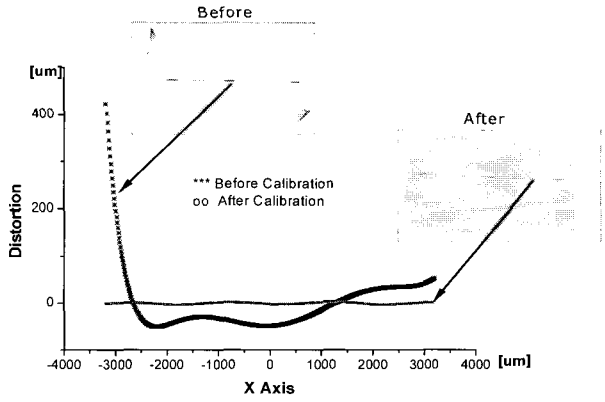


그림 7. 점광원의 위치 결정 전,후의 측정결과 비교.
Fig. 7. Measurement results before and after position determination.

의 위치오차에 의해 민감하게 왜곡되던 복원형상이 적용 전 500μm의 PV값에서 적용 후 3μm의 PV값으로 급격히 향상되었다. 하지만 복원된 형상은 최초의 CCD촬상면의 평면도 463nm와는 차이가 있음을 알 수 있는데, 이는 사용한 광원의 광량 안정성, 광원의 주파수 안정성, 광섬유 내부의 온도와 압력의 변화, 공기굴절률 변화, 진동, 광검출기(CCD) 배열의 비선형성, 전기적인 노이즈에 의해 발생되는 환경 및 시스템의 오차요인들이 원인이 되는 측정 불확도에 기인하는 것으로 예상된다.

V. 형상측정에 적용한 결과

멀티레터레이션법을 이용한 위치결정법 과정을 통해 획득된 점광원들의 위치 좌표값들을 이용하여 측정 시편의 형상을 측정하였다.

대상시편은 그림 8과 같이 개발 과정 중에 있는 그룹 성형된 칩모듈로 3개의 그룹 패키지가 스테인레스스틸 외곽 프레임에 고정되어 있으며 표면형상이 광산란 특성을 가지고 있어 기존의 비접촉식 측정법으로는 정밀 측정이 불가능한 시편이다. 각 그룹은 EMC(Epoxy Mold Compound) 성형을 통해 패키지 내의 칩을 보호 하고 있으며 여러 성형 조건에 따라 EMC의 형상이 왜곡되는 것으로 보고되고 있다. 50mm× 50mm 영역에 대해 측정한 결과 그림 8과 같이 최대 912μm의 휨 형상이 발생됨을 확인하였다. 측정대상인 EMC표면형상은 광산란 특성을 갖고 있어 기존의 비접촉식 측정법을 통해 수십 μm의 측정 정밀도를 구현하는 것으로 보고되고 있다[10]. 접촉식 프로파일러인 form taly surf와 비교 측정한 결과 그림 9와 같은 차이값을 획득하였다. 이는 측정영역의 대각선 방향을 비교 측정한 차이값의 결과이며, 최대(peak-to-valley) 9.8μm, 분산값 1.9μm로 나타났다.

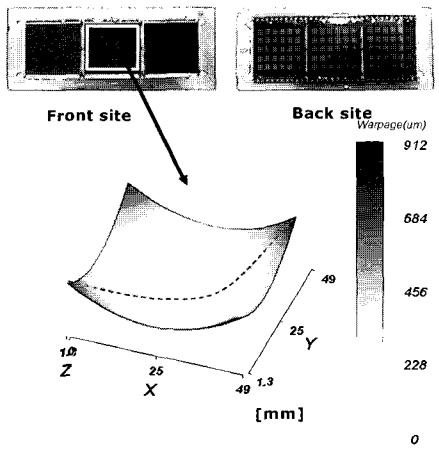


그림 8. Tape BGA(Ball Grade Array) 모듈 형상과 측정결과.
Fig. 8. Tape BGA(Ball Grade Array) module and measurement results.

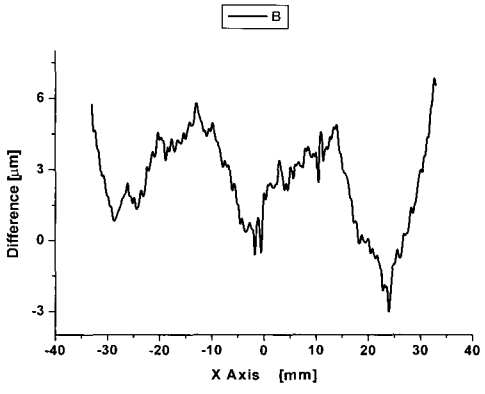


그림 9. 접촉식 프로파일러와 비교 측정 차이값.
Fig. 9. Measurement discrepancy in comparison with the results obtained by form taly surf instrument.

VI. 결론

공간상에 존재하는 한 점의 위치를 결정하기 위해 1대의 CCD카메라를 이용한 멀티레터레이션법을 구현하였다. 이는 GPS에 사용된 기준 인공위성의 좌표를 초기에 결정하는 SLR방법과 동일한 개념이며, 점광원 절대간섭계에서 점광원의 위치를 결정하는데 사용하였다. 점광원의 위치 결정에 오차가 있을 경우, 절대간섭계를 이용해 형상을 측정한 결과값이 심하게 왜곡되는 경향을 점광원부의 6자유도 운동오차 모델링을 이용하여 확인하였다. 제안된 위치결정법을 검증하기 위해 463nm 평탄도를 가진 CCD촬상면의 형상을 측정한 결과 최대 3μm의 PV값을 가지고 측정되었다. 최종 결정된 점광원의 위치정보를 가진 점광원 절대간섭계를 이용해 칩모듈의 왜곡된 형상을 50mm×50mm영역에서 측정하였다. 측정결과 칩모듈의 형상이 최대 912μm 왜곡되어져 있음을 발견하였으며, 기존의 접촉식 프로파일러와 비교하여 최대 9.8 μm의 측정값 차이를 보임을 알 수 있었다.

참고문헌

[1] E. B. Hughes, A. Wilson, and G. N. Peggs, "Design of a high-accuracy CMM based on multi-lateration techniques," *CIRP,* vol. 49, pp. 381, 2000.

[2] O. Nakamura, M. Goto, "Four-beam laser interfero- metry for three-dimensional microscopic coordinate measurement," *Applied Optics,* vol. 33, pp. 31, 1994.

[3] T. Takatsuji, Y. Koseki, M. Goto, and T. Kurosawa, "Restriction on the arrangement of laser trackers in laser trilateration," *Measurement Science & Technology,* vol. 9, pp. 1357, 1998.

[4] M. Goto, and T. kurosawa, "The first measurement of a three-dimensional coordinate by use of a laser tracking interferometer system based on trilateration," *Measurement Science & Technology,* vol. 9, pp. 38, 1998.

[5] Leick, Alfred, "GPS saterllite surveying," *NewYork 2nd edition,* 1995.

[6] B. C. Kim and S. W. Kim, "Absolute interferometer for three-dimensional profile measurement of rough surfaces," *Optics Letters,* vol. 28, no.7, pp. 528, 2003.

[7] G. E. Sommargren, "Diffraction methods raise interferometer accuracy," *Laser Focus World,* pp. 61, Aug, 1996.

[8] H. G. Rhee, and S. W. Kim, "Absolute distance measurement by two point diffraction interferometry," *Applied Optics,* vol. 41, no. 28, pp. 5921, 2002.

[9] P. Sutton, and S. Boyden, "Genetic algorithms: a general search procedure," *American journal of Physics,* vol. 62, pp. 549, 1994.

[10] G. J. Petriccione, and I. C. Ume, "Warpage studies of HDI test vehicles during various thermal profiling," *IEEE Transactions on advanced packaging,* vol. 22, no. 4, pp. 624, 1999.

김 병 창

1971년 1월 10일생. 1996년 부산대학교 기계공학과 학사. 1998년 한국과학기술원 기계공학과 석사. 2003년 한국과학기술원 기계공학과 박사. 2003년~2005년 2월 미국표준연구소(NIST) 연구원. 2005년 3월~현재 경남대학교 기계자동화공학부 교수. 관심분야는 광계측, 간섭계 설계, 자유곡면 형상측정.