

## 거친 표면 형상측정을 위한 점광원 절대간섭계의 오차해석과 시스템 변수의 보정

김병창<sup>†</sup>

경남대학교 기계자동화공학부  
☎ 631-701 마산시 월영동

김승우

한국과학기술원 기계공학과  
☎ 305-701 대전시 유성구 구성동

(2004년 11월 15일 받음, 2005년 3월 26일 수정본 받음)

표면거칠기가 큰 가공면의 표면형상을 비접촉 고속 측정 하기 위해 고안된 점광원 절대간섭계는 점광원의 위치가 시스템 변수로 정의된다. 시스템 오차인 점광원의 위치 오차가 측정 결과에 미치는 영향을 분석하며, 이를 보정하기 위해 CCD 카메라를 이용한 보정법을 제안한다. 제안된 방법을 검증하기 위해 기준면을 측정하여 측정 정밀도의 향상을 확인하며, 이를 거친 표면형상의 특징을 가진 칩모듈 측정에 적용하였다. 측정 결과 기존의 축척식 측정기와 50 mm x 50 mm의 영역에서 9.8  $\mu$ m의 측정 차이를 보임을 확인하였다.

주제어 : Point light source, Absolute Interferometer, Rough surface profile, Profilometry, Calibration.

### I. 서 론

연삭 또는 연마 공정을 이용한 정밀가공에 있어서 가공된 표면의 기하학적 형상 정밀도의 검사를 위한 삼차원 측정기술은 필수적으로 요구된다. 렌즈나 거울과 같이 가공된 표면의 거칠기가 고운 정면의 경우에는 일반적으로 가시광 영역의 레이저 광원을 이용한 트와이만-그린(Twyman-Green), 피죠펜(Fizeau) 등의 정통적인 간섭법이 효과적으로 이용된다. 반면, 가공된 표면의 거칠기가 가시광의 파장의 수준으로 거친 측정대상물의 경우에는, 상기 광간섭 기술은 소위  $2\pi$ -모호성(ambiguity)와 스펙클 현상 등으로 인해 측정이 어렵게 된다.

거친 표면의 형상측정을 위해서는 긴 파장의 적외선 광원(infrared light source)을 사용하거나,<sup>[1,2]</sup> 경사입사법(Grazing incidence)<sup>[3]</sup>, 또는 이중파장(two-wavelength synthesis)<sup>[4]</sup>을 이용한 측정 방법들이 연구되었다. 이러한 방법들은 기본적으로는 기존의 두팔간섭(Two-arm interferometry)의 원리에 근거하면서 단지 등가파장을 증가시키는데 목적을 두고 있어, 측정할 수 있는 표면 거칠기의 확대에는 한계가 있었다. 이러한 근원적인 문제점을 극복하기 위해 최근에 본 논문의 저자들에 의해 제안된 점광원 절대간섭계<sup>[5]</sup>는 가시광의 파장을 그대로 유지하는 반면 새로운 간섭투영법을 사용함으로써 가시광 파장보다 차수가 높은 매우 거친 표면의 형상측정을 가능하게 하였다.

본 논문의 대상인 점광원 절대간섭계는 멀티레터레이션(Multilateration)법<sup>[6]</sup>이라고 정의되는 위성항법시스템(GPS : Global Positioning System)의 기본 원리에 근거한다. 이는 공

간 임의의 한 점의 삼차원 위치를 결정하기 위해, 위치를 알고 있는 최소 3개의 임의의 점(station)으로부터 측정점까지의 거리를 계측하고, 이들 거리들을 이용하여 측정점의 삼차원의 위치를 결정한다. 점광원 절대간섭계는 광섬유를 통해 쉽게 획득할 수 있는 고정밀의 구면광을 기준광으로 사용하여,<sup>[7]</sup> 기존의 밀티레터레이션 측정 시스템에서 발생하는 여러 문제점들이 제거되는 장점을 가진다. 반면 정밀한 측정을 위해서는 최소 3개의 기준점의 위치가 우선적으로 신뢰성 있게 결정되어야 하므로, 이를 절대간섭계의 시스템 변수로 정의 하고 변수 오차에 따른 해석과 이를 결정할 방법을 모색할 필요가 발생한다. 본 연구에서는 점광원 절대간섭계의 시스템 변수 오차에 따른 측정 정밀도의 영향과 이를 보정하는 방법을 제안하고 검증하고자 한다.

### II. 점광원 절대간섭계의 시스템 변수 정의 및 영향 고찰

거친 표면 형상측정을 위한 절대간섭계는 Fig. 1과 같이 이웃하는 한쌍의 점광원을 광원부로 하는 3개 이상의 광원부와 간섭무늬 획득을 위한 카메라로 구성된다. 이웃하는 두 점광원으로부터 발생되는 두 구면광은 서로 간섭하여 측정물체 표면에 간섭무늬를 형성한다. 이때 CCD카메라를 통해 관측되는 간섭무늬를 해석하여 획득된 위상정보는 광원부로부터 측정점까지의 거리정보를 제공한다. 위성항법시스템의 좌표결정법에 따라 측정점의 좌표는 3개 이상의 점광원부로부터 각각 획득되는 거리정보를 획득하면 결정될 수 있다. 위치가 알려진 점광원의 좌표가  $(x_i, y_i, z_i), (x'_i, y'_i, z'_i)$

<sup>†</sup>E-mail: bckim@kyungnam.ac.kr

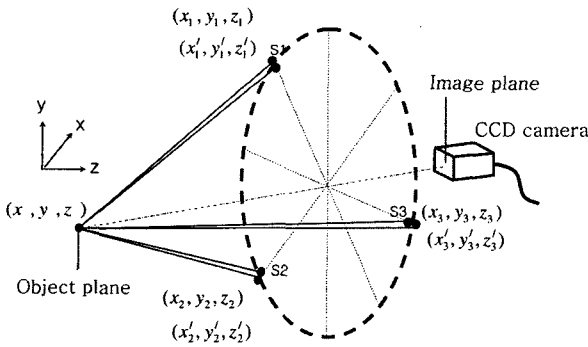


그림 1. 점광원 절대간섭계의 시스템 구성도.

$i=1,2,3$ . 이고, 측정점의 좌표가  $(x, y, z)$ 일 때 측정점에서 획득되는 위상은 다음과 같이 표현된다.

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

$i = 1, 2, 3$ .

여기에서  $i$ 는 광원부의 순서이며,  $k$ 는 전파상수(propagation coefficient)이다. 3개의 미지수를 가지는 한 점의 측정 좌표값  $(x, y, z)$ 은 각각 다른 3개의 점광원을 이용한 위상 값들로부터 결정될 수 있다. 이를 해를 구하는 과정에서 널리 알려진 Newton Rapshon 등과 같은 수치해석을 적용하게 된다.

식(1)에서 측정 좌표값  $(x, y, z)$ 를 제외한 점광원의 위치 좌표값  $(x_i, y_i, z_i), (x'_i, y'_i, z'_i) i=1,2,3$ 를 절대간섭계의 시스템 매개변수로 정의 할 수 있으며, 이들 매개변수는 시스템 구성 단계에서 선행되어 결정되어야 한다. 먼저, 정의된 매개변수인 점광원의 위치오차가 전체 측정결과에 미치는 영향을 관찰하기 위해 점광원의 위치를 Fig. 2에서와 같이 6자유도의 운동으로 정의하였다. 점광원의 6자유도는 광원부의 병진운동( $T_x, T_y, T_z$ ) 3개, 두 점광원간의 상대거리( $d$ ) 1개, 광원부의 중심으로부터 절대 좌표계의 원점을 향하는 광축을 중

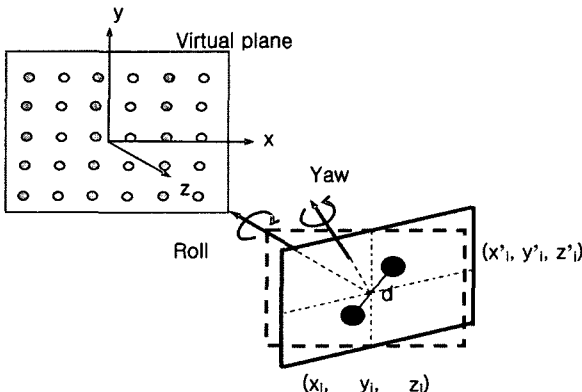


그림 2. 점광원의 위치보정 오차가 측정 결과에 미치는 영향을 분석하기 위한 모델링.

심으로 회전하는 롤운동(Roll motion) 1개, 그리고 광축과 두 점광원간의 거리방향에 수직인 축을 중심으로 회전하는 요 운동(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 시스템 매개변수인 점광원의 위치오차에 따라 왜곡되어져 복원되는데, 왜곡의 정도를 통해 시스템 변수 오차가 측정결과에 미치는 영향을 살펴볼 수 있다. Fig. 3(a)는 3개의 점광원부에 각각 요 운동의 각도 오차가  $1^\circ$  삽입되었을 때 가상평면이 왜곡된 형상이다. 90 mm(90 mm 영역의 가상평면을 고려하였으며, 수치모사(simulation)를 실시한 결과, 왜곡의 정도가 최대(Peak-to-Valley)값으로 5 mm로 나타났다. Fig. 3(b), Fig. 3(c), Fig. 3(d)는 각각 점광원부의 롤운동에  $1^\circ$  각도오차를, 점광원간 상대거리에 10  $\mu\text{m}$  거리오차를, 그리고 모든 운동에 오차를 삽입 하였을 경우 가상평면의 왜곡정도를 각각 나타낸다. 가상평면의 왜곡 정도는 각 운동의 오차량에 따라 변화하므로, 수치모사를 통한 왜곡 현상은 각각의 오차에 따른 경향성만을 대표한다고 하겠다. 따라서 위성항법시스템 좌표결정법을 기초로 하는 절대간섭계의 경우 시스템 변수의 정밀한 보정이 절실히 요구되며, 제안된 보정법의 검증이 필수적이다.

### III. 시스템 변수 보정법

점광원부의 위치를 매개변수로 하는 점광원 절대간섭계는 측정 간섭 시스템이 구성될 때 일회적으로 점광원부의 위치를 결정할 보정법이 요구된다. 이를 위해 Fig. 4에서 보여지는 바와 같이 결상광학계가 제거된 CCD를 사용하였다. CCD는 평면 위에  $640 \times 480$ 개의 화소(pixel)가 일정 간격으로 위치 한 잘 보정된 기준을 제공하므로, 일단 CCD평면 위에 절대 좌표계의 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 보정하고자 하는 점광원부 내의 두 점광원의 좌표값은 6개의 변수  $(x_1, y_1, z_1)$ 와  $(x'_1, y'_1, z'_1)$ 로 표현되므로 CCD평면의  $640 \times 480$ 개의 화소로부터 획득되는 거리정보를 최적화하는 6개의 변수를 결정할 수 있다. CCD 각 화소에서 획득되는 거리정보는 두 점광원에서 발산된 두 구면광의 간섭에 의해 생성되는 위상식으로 정의되며 수식2와 같이 표현된다.

$$\Phi_{ij} - \Phi_0 = k [r_{ij} - r_0 - r'_0 + r_0] \quad (2)$$

$$\text{Where } r_{ij} = \sqrt{(x_i - x_{ci})^2 + (y_i - y_{cj})^2 + (z_i)^2}, r'_0 = \sqrt{(x'_1 - x_{c1})^2 + (y'_1 - y_{c1})^2 + (z'_1)^2}$$

$$r_0 = \sqrt{(x_1)^2 + (y_1)^2 + (z_1)^2}, r'_0 = \sqrt{(x'_1)^2 + (y'_1)^2 + (z'_1)^2} \quad i=1, \dots, 640 \quad j=1, \dots, 480$$

여기에서  $\Phi_{ij}$ 와  $\Phi_0$ 는 CCD의  $(i,j)$ 번째 화소와 원점에서 각각 획득된 위상값이며,  $k$ 는 전파상수,  $(x_{ci}, y_{cj})$ 는 CCD 각 화소들의 좌표값을 나타낸다. 식(2)에서 절대좌표계 원점에서

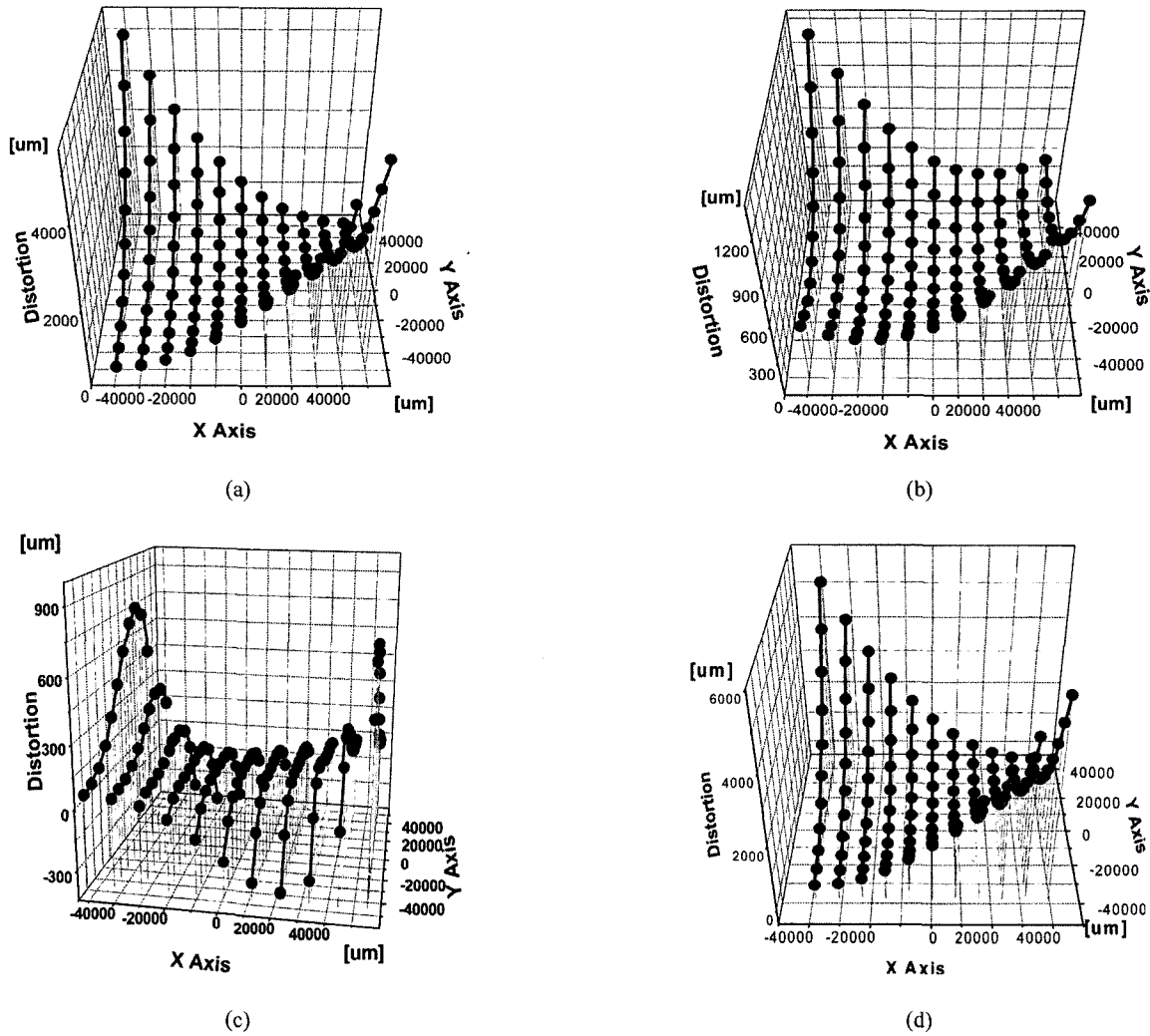


그림 3. 점광원 위치 보정 오차에 따른 가상평면의 왜곡형상 (a)Yaw운동 오차에 의한 왜곡, (b)Roll운동 오차에 의한 왜곡, (c)점광원간 거리 오차에 의한 왜곡, (d) 6가지 합성오차에 의한 왜곡.

획득되는 위상값( $\Phi_0$ )과 원점으로부터 두 점광원간의 거리차 ( $r_0 - r'_0$ )를 각각 양변에서 뺀 이유는 두 점광원 간에 존재하는 초기 위상의 차이를 상쇄시키기 위해서이다.<sup>[8]</sup> 6개의 미지수를 결정하기 위해 CCD의 모든 화소에서 획득되는 정보를 이용하여 수식3과 같이 오차함수를 구성하였다.

$$E(x_i, y_i, z_i, x'_i, y'_i, z'_i) = \sum_{i=1, j=1}^{640, 480} [\Phi_{ij} - \Phi_0 - k(r_{ij} - r'_{ij} - r_0 + r'_0)] \quad (3)$$

식(3)을 최적화하는 6개의 변수를 구하기 위한 방법으로 많은 방법들이 알려져 있으나, 시스템 변수 보정은 단 일회행해지며, 오차함수가 국소 최소값(Local minimum)을 상당수 가지고 있음을 고려하여 시간이 오래 걸리지만, 신뢰성 있는 최적값(Global minimum)을 제시하는 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm)을 이용하였다.<sup>[9]</sup>

고정된 보정용 CCD카메라를 중심으로 절대간섭계의 각 광원부를 순차적으로 보정하여 모든 시스템 변수들을 결정하였으며, 이를 검증하기 위한 과정을 다음과 같이 수행하였다. 검증을 위한 기준평면으로는 높은 평탄도(flatness)를 가진 거친표면이 필요하므로 이는 2점의 가상평면에 해당되어 현실적으로 존재하지 않는 측정 기준면이다. 따라서 본 연구에서는 시스템 변수의 보정값 검증을 위해 보정과정에 사용되었던 CCD카메라의 촬상면을 기준면으로 사용하였다. 즉, Fig. 1에서 결상면(Image plane)에 위치한 카메라를 결상광학계를 제거한 다음 물체면(Object plane)에 두면 카메라의 촬상면의 형상이 측정이 되므로 보정 검증을 위한 이상적인 기준면이 된다. Fig. 5는 보정 전,후의 측정 결과를 보여주며 비교결과 확연히 향상됨을 확인할 수 있다.

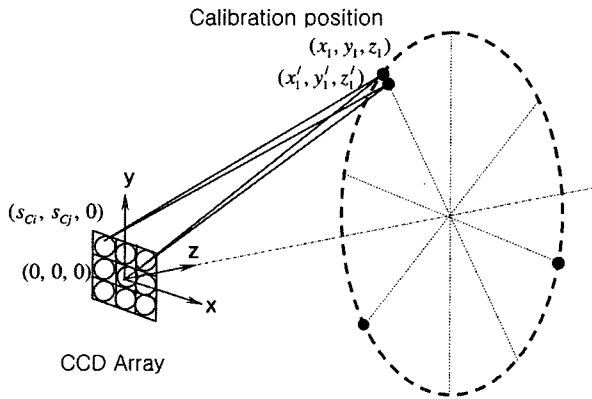


그림 4. CCD카메라를 이용한 점광원의 위치 보정 원리.

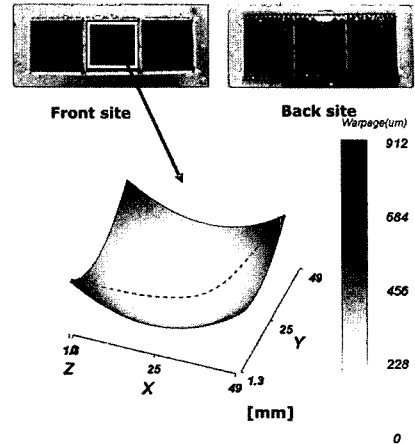


그림 6. Tape BGA(Ball Grade Array) 칩모듈과 휨 형상 측정 결과.

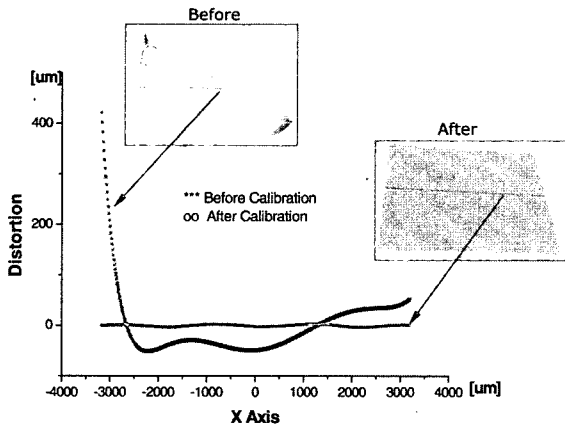


그림 5. 보정 전, 후의 측정 결과 비교.

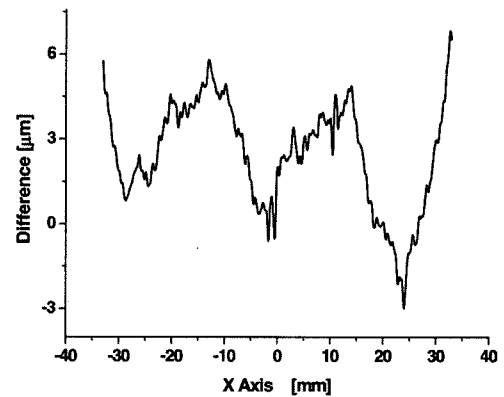


그림 7. 접촉식 프로파일러와의 측정 결과 차이.

#### IV. 측정결과

보정 과정을 통해 획득된 점광원들의 위치 좌표값들을 이용하여 측정 시편의 형상을 측정하였다. 대상시편은 Fig. 6과 같이 개발 과정 중에 있는 그룹 성형된 칩모듈로 3개의 그룹 패키지가 스테인레스스틸 외곽 프레임에 고정되어 있다. 각 그룹은 EMC(Epoxy Mold Compound) 성형을 통해 패키지 내의 칩을 보호하고 있으며 여러 성형 조건에 따라 EMC의 형상이 왜곡되는 것으로 보고되고 있다. EMC의 표면적 특성은 가시광 영역의 파장에 대해 광산란이 일어나며, 조립 특성상 수 마이크로의 제작 정밀도와 측정 정밀도를 요구하는 메조영역(Mezo-Area) 제품의 특성을 가진다. 50 mm×50 mm 영역에 대해 측정한 결과 Fig. 6과 같이 최대 912 μm의 휨 형상이 발생됨을 확인하였으며, 접촉식 프로파일러인 Form Taly Surf와 비교 측정한 결과 그림8과 같은 차이값을 보임을 알 수 있다. 이는 측정영역의 대각선 방향을 비교 측정한 차이값의 결과이며, 최대(Peak-to-Valley) 9.8 μm, 분산 값 1.9 μm로 나타났다. 이는 시스템 변수의 보정에서 발생하는 보정오차, 각 비교측정의 환경 조건 불일치 및 측정 비교 대상(scanning line)의 불일치 등이 요인이라 볼 수 있다.

#### V. 결 론

거친 표면 측정을 위한 점광원 절대간섭계는 점광원의 위치오차가 측정 결과에 큰 영향을 미치는데, 이를 분석하기 위해 점광원의 위치오차를 6개의 운동오차 모델링으로 구성하여 확인하였다. 시스템 오차로 정의되는 점광원의 위치오차를 보정하기 위한 방법으로 CCD 카메라를 사용하는 방법을 제안했으며, CCD 각 화소들에서 획득된 위상값들을 최적화 하는 매개변수를 결정함으로써 점광원의 위치 좌표값을 획득하였다. 제안된 보정법을 통해 획득된 시스템 변수는 보정 전에 비해 측정 정밀도를 획기적으로 향상 시켰으며, 이를 이용해 칩모듈의 왜곡된 형상을 50 mm×50 mm영역에서 측정하였다. 측정결과 칩모듈의 형상이 최대 912 μm 왜곡되어 있음을 발견하였으며, 기존의 접촉식 프로파일러와 비교하여 최대 9.8 μm의 측정값 차이를 보임을 알 수 있었다.

#### 감사의 글

이 논문은 한국과학재단의 해외 Post-doc. 연구지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

[1] O. Kwon, J. Wyant, and C. Hayslett, "Rough surface interferometry at 10.6 $\mu$ m," *Appl. Opt.*, vol.19, no.11, pp. 1862, 1980.

[2] K. Verma, B. Han, "Far-infrared fizeau interferometry," *Applied Optics*, vol.40, no.28, pp. 4981, 2001.

[3] P. J. de Groot, "Grating interferometer for flatness testing," *Opt. Lett.* vol.21, no.3, pp. 228, 1996.

[4] Y. Y. Cheng, J. Wyant, "Two-wavelength phase shifting interferometry," *Appl. Opt.* vol.23, pp. 4539, 1984.

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

[6] T. Takatsuji, M. Goto, T. Kurosawa, Y. Tanimura, Y. Koseki, "The first measurement of a three-dimensional coordinate by use of a laser tracking interferometer system based on trilateration," *Meas. Sci. Technol.* vol.9, no.1, pp. 38, 1998.

[7] Gray E. Sommargren, "Diffraction methods raise interferometer accuracy," *Laser Focus World*, vol.32, no.8, pp. 6, 1996.

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

[9] Cezard Z. Janikow, Zbigniew Michalewicz, "A specialized genetic algorithm for numerical optimization problems," *Proc 2 Int IEEE Conf Tools Artif Intell*, pp. 798, 1990.

**Multiple-Point-Diffraction Interferometer : Error Analysis and Calibration**

Byoung-Chang Kim<sup>†</sup>

*Department of Mechanical Engineering and Automation, Kyungnam University,  
Wolyoung-dong, Masan 631-701, Korea*

Seung-Woo Kim

*Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology,  
Science Town, Daejeon, 305-701, Korea*

<sup>†</sup> E-mail: bckim@kyungnam.ac.kr

(Received November 15, 2004, Revised manuscript March 26, 2005)

An absolute interferometer system with multiple point-sources is devised for the 3-D measurement of rough surface profiles. The positions of the point sources are determined to be the system parameters that influence the measurement accuracy, so they are calibrated precisely prior to performing actual measurements. For the calibration, a CCD camera composed of a two-dimensional array of photo-detectors was used. Performing optimization of the cost function constructed with phase values measured at each pixel on the CCD camera, the position coordinates of each point source is precisely determined. Measurement results after calibration performed for the warpage inspection of chip scale packages (CSPs) demonstrate that the maximum discrepancy is 9.8 mm with a standard deviation of 1.5 mm in comparison with the test results obtained by using a Form Taly Surf instrument.

OCIS Codes : 120.3180, 120.4570, 120.6660, 120.4630.