

# 자가보정법을 이용한 정밀 스테이지의 직각도 보정

## Orthogonality Calibration of a High Precision Stage using Self-calibration Method

김기현<sup>1,✉</sup>, 박상현<sup>1</sup>, 김동민<sup>1</sup>, 장상돈<sup>1</sup>  
Kihyun Kim<sup>1,✉</sup>, Sang-Hyun Park<sup>1</sup>, Dongmin Kim<sup>1</sup> and Sangdon Jang<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 삼성전자 생산기술연구소 (Mechatronics and Manufacturing Technology Center, Samsung Electronics)  
✉ Corresponding author: kihyun12.kim@samsung.com, Tel: 031-200-2416

Manuscript received: 2009.7.7 / Revised: 2009.10.16 / Accepted: 2009.12.2

*A high precision air bearing stage has been developed and calibrated. This linear-motor driven stage was designed to transport a glass or wafer with the X and Y following errors in nanometer regime. To achieve this level of precision, bar type mirrors were adopted for real time  $\Delta X$  and  $\Delta Y$  laser measurement and feedback control. With the laser wavelength variation and instability being kept minimized through strict environment control, the orthogonality of this type of control system becomes purely dependent upon the surface flatness, distortion, and assembly of the bar mirrors. Compensations for the bar mirror distortions and assembly have been performed using the self-calibration method. As a result, the orthogonality error of the stage was successfully decreased from  $0.04^\circ$  to  $2.48$  arcsec.*

Key Words: Orthogonality (직각도), Precision Stage (정밀 스테이지), Calibration (보정), Interferometer (인터페로미터)

### 기호설명

- $\Theta$  = angle between Y1 and Y2 interferometer head
- $\Phi$  = Yaw error of precision stage
- $\alpha_{xy}$  = directional orientation of the system
- $\beta_{ij}$  = inner angle of polygon between reference plane of i plane and of j plane
- $\gamma_k$  = angle between the bar mirror reference plane and the reference plane of a plane of polygon

### 1. Introduction

디스플레이와 반도체 등의 전자 산업은 높은 정밀도를 요구하는 다양한 장비들로 인하여 고생산성과 집적도를 구현한다. 높은 정밀도의 장비를 구성 시, 시편 혹은 장치를 정밀하게 움직여주는 스테이지와 센서, 그리고 재료 등을 주의해서 선

정해야 함은 물론 설치 및 제작에도 여러 요인을 없앨 수 있도록 해야 한다. 한 예로써, 시스템의 가장 큰 에러 요인인 아베(Abbe) 에러를 줄이기 위하여 위치 제어 용 센서로써 선형 스케일러 대신 인터페로미터를 사용하는 경우가 있다. 인터페로미터를 이용하는 스테이지의 정밀도는 환경 원인을 제외하는 경우, 순수하게 바미러의 형상과 조립 오차 및 제어 시스템의 영향에 의하여 결정된다. 바 미러에 의한 오차를 X와 Y의 바미러 형상에 의한 에러인 직각도와 바 미러들의 조립에 의한 에러인 XY의 직각도로 분리하여 생각할 수 있으며, 본 연구는 직각도에 대한 보정을 수행하는 것을 목적으로 한다.

아래와 같이 다양한 보정 방법이 많은 연구자들에 의하여 개발되었다. 첫 번째 방법은 매개 변수 보정(Parametric Calibration)이다.<sup>1</sup> 매개 변수 보정은 측정 위치에서의 6 자유도 에러를 관심 위치

에러로 고려하기 위하여 행렬을 이용하는 방법이다. 이 방법은 6 자유도 에러의 측정 시스템의 측정 정확도와 운동 모델의 정확도에 의하여 에러 정확도 수준이 결정된다.

두 번째 방법은 표준 시편을 이용하는 것이다. 표준 시편법은 보정 방법 중 가장 편리하며 일반적으로 정확도 수준이 높은 방법이다. 그러나 높은 정확도 확보를 위하여 사용하는 사람과 장비의 활용에 맞추어 시편을 정확하게 만들어야 하는 문제가 있다. 정확도 및 시편의 크기에 따라 제작 가격은 급격하게 증가함은 물론 가공이 불가능한 경우도 발생하게 된다.

세 번째로 자가보정법이 있다. 자가보정법은 원칙적으로 시편을 통하여 측정되는 다양한 에러들을 활용하여 관심있는 에러들을 예를 들어, 스테이지의 진직도와 직각도- 분리하는 방법이다. 그러므로, 이 방법은 낮은 정확도를 갖는 시편을 이용하여도 시스템이 갖는 반복도 수준으로 시스템의 정확도를 보정할 수 있다는 장점이 있다. 이러한 편리성과 경제적 이유로 인하여 대형 시스템과 정밀한 표준 시편을 제작하기 어려운 시스템에 사용된다.

반전법(Reversal Method) 혹은 에러 분리법(Error Separation Method)로써 알려진 자가 보정법은 몇몇 연구자들에 의하여 적용되었다. Evan 과 Hoken<sup>2</sup> 은 한 축의 진직도 보정, Hocken 과 Borchardt<sup>3</sup> 은 한 축의 직각도 보정을 수행하였다. Lieberman<sup>4</sup> 은 처음으로 시편을 회전하는 개념을 사용하여 초기 전자빔 노광 시스템의 보정을 수행하였다. Raugh<sup>5,6</sup> 와 Takac<sup>7</sup> 은 Lieberman<sup>8</sup> 에 의하여 수행된 2 차원 보정을 수학적으로 체계화 하였다. Hume<sup>9</sup> 은 2 차원 직각도 보정을 위하여 각도 측정방법을 사용하였는데, 이는 본 연구에서 정사각형 구간에 대하여 적용되었다. Ruiji<sup>10</sup> 은 인터페로미터를 이용한 스테이지의 미리 진직도 보정을 위하여 에러 분리법을 적용하였다.

본 연구에서는 평판디스플레이 용 정밀 스테이지 혹은 가공기와 비대칭적인 운동 구간을 갖는 인터페로미터를 이용한 제어시스템의 보정을 위하여 Evan, Hume, 그리고 Ruiji 의 방법을 적용하였다.

본 논문의 구성은 네 부분으로 구성된다.

첫 번째, 기 연구된 보정기술 및 특징에 대하여 기술한다.

두 번째, 본 논문에서 보정을 필요로 하는 정밀 스테이지의 구성 및 간단한 제어 성능 결과를 설명한다.

세 번째, 코사인과 직진도 보정 및 수행 결과를 기술한다.

끝으로, 스테이지의 직각도를 보정하고 실제로 구성된 보정 장치와 보정 결과에 대하여 정리하고 TFT(Thin Film Transistor) 글래스를 이용하여 보정 결과를 검토한다.

## 2. Precision stage using interferometer system as a positioning sensor

보정이 수행될 스테이지의 구동기는 속도리플 및 추적에러(following error)를 최소화하기 위하여 선형 파워와 앰프 그리고 무철심(Coreless) 모터로 구성되고 가이드는 공기베어링, 위치 센서로는 10nm 분해능을 갖는 Renishaw 사<sup>11</sup> 인터페로미터가 적용된다.

스테이지의 주요 성능은 유효 행정 영역(400 mm X 700 mm)에서 50nm@10mm/s 의 추적 에러와 1 μm 이하의 진직도, 그리고 1arcsec 의 직각도이다. 요구되는 정밀 수준을 만족하기 위하여 스테이지는 인터페로미터를 위하여 길이 550mm 와 1000mm 의 바미러가 설치된다. 그리고 고속 제어를 수행하기 위하여 ACS 사<sup>12</sup> SpiiPlus 가 적용된다. 레이저 인터페로미터의 큰 단점인 환경의 영향 문제를 최소화하기 위하여 온도, 습도, 그리고 압력을 위한 환경보상 장치(RCU 10)가 적용되고 환경변화에 의한 스테이지의 변형을 최소화하기 위하여 엄격한 환경 제어(23±0.1°C, 50±1% RH) 시스템이 구성된다.

Table 1 Descriptions of the stage

Actuator	Trilogy 410 Coreless motor
Sensor	Renishaw 10 nm interferometer
Guide	5um gap Orifice type airbearing
Amplifier	TA 320 linear amplifier
Controller	ACS SpiiPlus
Working area	Step(X) = 0.4m, Scan(Y) = 0.7m
Environment	23±0.1 °C, 50±1 % RH

정밀 스테이지를 750mm@10mm/s 스캔 정속 구동 시에 Fig. 2 에서 보여주는 것과 같이 추적 에러는 ±50nm 이하이다. 또한, X 축 에러는 ±30nm 이하이고, 환경 영향을 고려할 때 회전 오차, 진직도, 그리고 직각도의 자가 보정에 의하여 얻을 수 있는 수준은 약 ±100nm 이상이다.

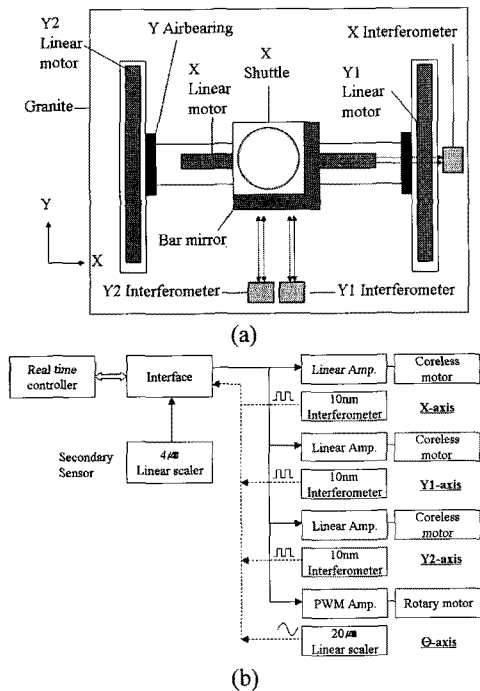


Fig. 1 Schematic and control block diagram of the precision stage: (a) Schematic, (b) Control block diagram

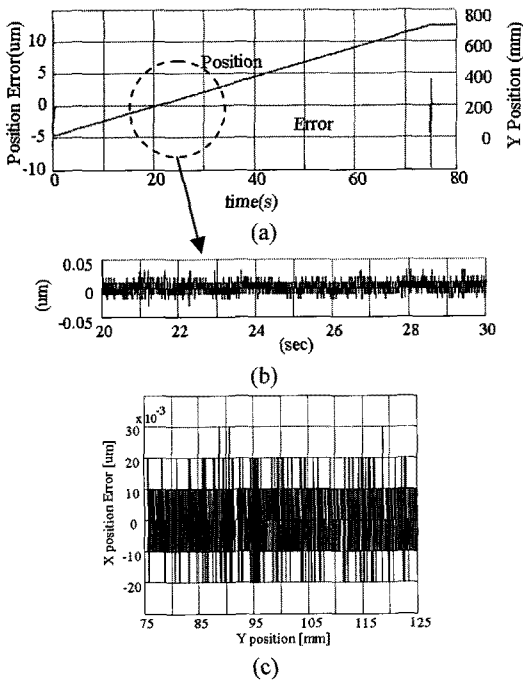


Fig. 2 Errors at scanning motion: (a) motion profile, (b) Y following error, (c) X jitter and in-position

### 3. Principle of calibration of precision stage

#### 3.1 Yaw and straightness

본 연구에서 수행된 보정 과정은 Fig. 3 에서 보여주는 것과 같다. 첫째, 코사인 에러에 의한 선형 회전 오차에러를 보정하고, 둘째, 바 미러 자체의 형상 오차와 바 미러의 조립에 의한 비선형 성분의 진직도 보정을 진행한다. 이렇게 인터페로미터 시스템에 의한 오차와 비선형 성분을 최소화한 후, 최종적으로 바 미러 조립 오차에 의한 직각도 보정을 수행한다.

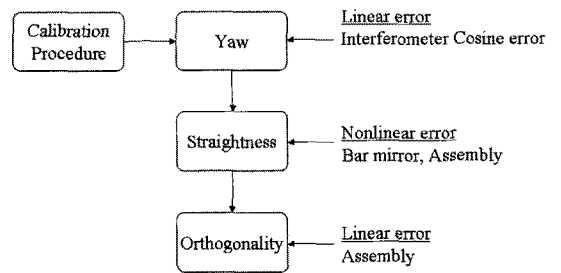


Fig. 3 Procedure of orthogonality calibration

Fig. 4 를 관찰하면, Y1, Y2 인터페로미터 헤드 설치 오차(Θ)에 의한 코사인 에러는 스테이지 에러 성분 중 회전 오차(Φ)의 선형 성분으로 나타난다. 이러한 회전 오차는 Renishaw<sup>11</sup>의 위치 평가 시스템(ML10)을 이용하여 평가할 수 있으며 본 연구에서 개발된 스테이지는 약 2 arcsec 를 갖는다. 이 에러를 역으로 추정하면, 헤드 설치 오차가 약 250 arcsec 가 된다. 기구적으로 조절하는 것이 한계가 있어 Y1 과 Y2 센서 값에 0.999992662 의 일정 비율 값을 제어기에 적용하여 위치 보정을 수행함으로써 Fig. 5 와 같이 ±0.1 arcsec 의 반복도를 확보하였다.

$$\phi = \sin^{-1}\left(\frac{L(1 - \cos \theta)}{l}\right) \quad (1)$$

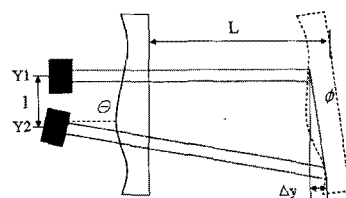


Fig. 4 Yaw error caused by angle between Y1 and Y2 interferometer head

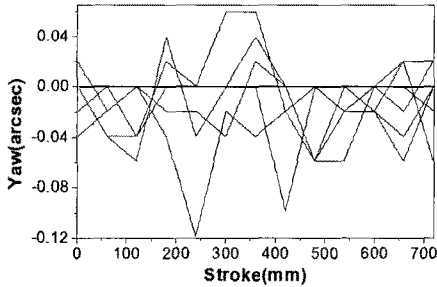


Fig. 5 Yaw calibration using a laser calibration system

바 미러 형상 및 조립에 의하여 스테이지는 비선형 성분인 진직도 에러를 갖는다. 특히, 스테이지의 직각도 보정 시, 바 미러가 비선형 모형을 유지하고 있을 경우에 비선형 성분을 선형으로 가정하고 보정을 수행한다면 보정된 직각도는 높은 정확도를 갖지 못한다는 것을 예측할 수 있다.

그러므로 직각도 보정을 수행하기 전에 스테이지 에러 중 비선형 성분인 진직도를 보정해야 한다. Fig. 6 의 실험 장치와 같이, 본 연구에서는 진직도 보정을 위하여 Lion 사<sup>13</sup> 정전용량센서와 Obishi 사<sup>14</sup> 스트레이트 에지를 사용한 반전법이 적용되었다. 자가보정에 의하여 평가된 진직도는 Y 축 2 $\mu\text{m}$ , X 축 4.4 $\mu\text{m}$  이었다(Fig. 7). X 와 Y 진직도 보정을 수행하여 Renishaw 측정 기준 0.8  $\mu\text{m}$  이내의 진직도 성능을 확보하였다(Fig. 8).

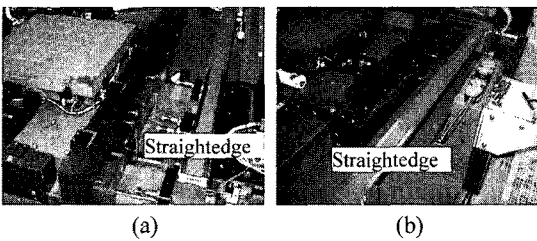


Fig. 6 Self-calibration setup for (a) Y- and (b) X-directional straightness

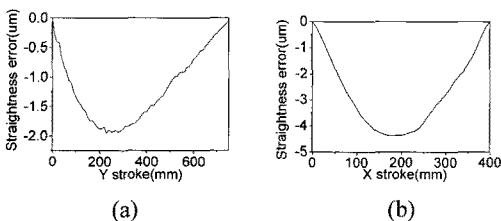
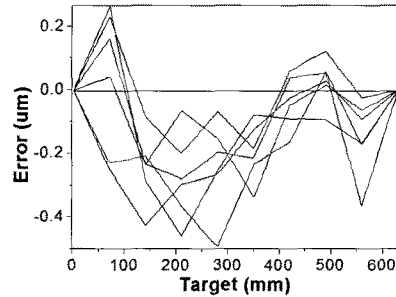
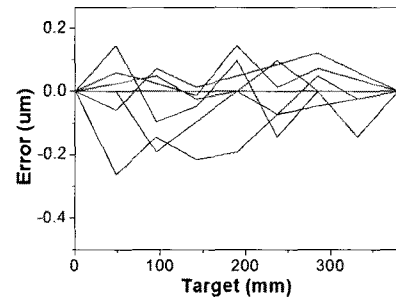


Fig. 7 Straightness of the uncalibrated precision stage: (a) Y-direction and (b) X-direction



(a)



(b)

Fig. 8 Calibrated straightness: (a) Y-direction and (b) X-direction

#### 4. Calibration of orthogonality

##### 4.1 Orthogonality

서론에서 언급하였듯이, 자가 보정을 위하여 Hume 에 의하여 논의된 방법이 적용된다. 바 미러의 직각도를 자가 보정하기 위한 개념과 과정을 Fig. 9 에서 보여준다. 기준 사각형(Polygon)은 스테이지 부에 고정되고 스테이지가 기준 사각형의 가용 구간 만큼 해당하는 행정을 XY 방향으로 이송하면서 정전용량 센서에 의하여 기준 사각형의 직각면(A, B)이 측정된다. 기준 사각형을 90° 회전시킨 후, 동일한 과정(D, A)을 수행하며 이와 같은 회전을 2회 반복한다. 각 회전 시에, Fig. 9에서 표시된 기준 사각형측정 면의 기준 면과 바 미러의 기준 면 사이의 각도( $\gamma$ 's)와 기준 사각형내부 각도( $\beta$ ), 그리고 스테이지의 직각도의 상관 관계를 식 (2)와 같이 얻을 수 있다. 내부 각들의 합은 360° 이므로 4 번의 측정 실험을 통하여 식 (3)과 같이 직각도( $\alpha_{xy}$ )오차를 생성할 수 있다. 본 연구에서는 앞서 언급된 대로 회전 오차와 진직도와 같은 비선형 성분의 오차가 보정을 통하여 직각도 보정에 영향을 미치지 않는다고 가정한다.

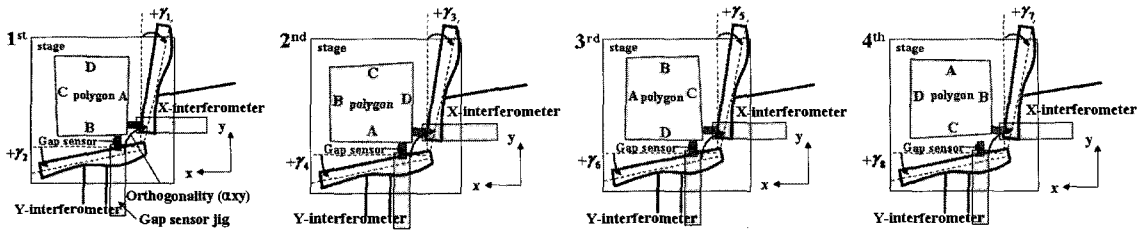


Fig. 9 Self-calibration setup and calibration procedure for orthogonality

$$\begin{aligned} \alpha_{xy} &= \beta_{BA} + \gamma_1 + \gamma_2 \\ \alpha_{xy} &= \beta_{AD} + \gamma_3 + \gamma_4 \\ \alpha_{xy} &= \beta_{DC} + \gamma_5 + \gamma_6 \\ \alpha_{xy} &= \beta_{CB} + \gamma_7 + \gamma_8 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\alpha_{xy} = \frac{1}{4} \left( 2\pi + \sum_{k=1}^8 \gamma_k \right) \quad (3)$$

### 4.2 Experimental setup

Fig. 10 과 같이 직각도 보정을 위한 측정시스템은 진직도에서 사용된 Lion 사의 정전용량 센서 두 개와 Obishi 사에서 제작된 230X190mm<sup>2</sup> 크기의 기준 사각형 한 개로 구성된다.

직각도 보정에 자가 보정법의 적용을 위하여 4 개의 측정데이터가 필요하다. 각각의 측정시 기준 사각형의 면들은 10 번의 반복 측정을 수행한다. 보정이 요구되는 스테이지의 구동 영역(400X700 mm<sup>2</sup>)에 비해 상대적으로 작은 사이즈의 기준 사각형으로도 전체 영역을 위한 직각도 보정이 가능한 것은 앞에서 언급하였듯이 회전 오차 및 진직도 보정을 통해 시스템의 비선형성 에러를 제거하여 1 차 보정된 스테이지의 에러는 바 미러의 설치에 의한 직각도만이라고 가정을 할 수 있기 때문이다. 장행정을 위한 직각도 판별을 위하여 사용된 정전용량 센서는 바미러와의 충돌을 방지하기 위하여 200 μm@5 V 측정 범위를 갖는 것을 사용하였다. 그리고, 14 bit 의 아날로그 입력을 이용하여 위치 데이터를 처리하므로 정전용량 센서에 의한 분해능은 이론적으로 약 2.5 nm 이고 이것은 스테이지 정지정밀도에 의한 오차 보다 작으므로 진직도 오차 및 직각도 오차에 영향이 없다고 볼 수 있다.

## 5. Result

### 5.1 Orthogonality error

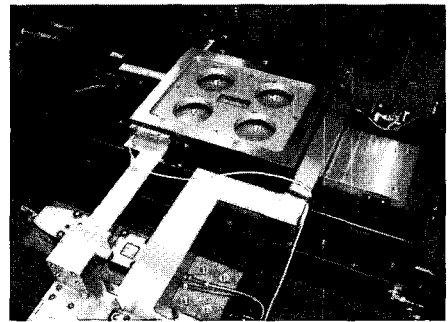


Fig. 10 Experimental setup for orthogonality calibration

Fig. 11 과 같이 직각도 보정을 수행하기 전 측정 센서에 의한 불확도를 확인하기 위하여 스테이지를 이동하면서 위치 별로 10 회씩 반복 측정 한 후, 센서의 흔들림에 대한 표준 편차를 획득한 결과 X 축 정전용량 센서는 20nm, Y 축 용 센서는 29 nm 의 표준 편차 범위를 나타냈다. 이를 통하여 보정 시 한계 값은 40nm 정도에 상응하는 각도 값으로 예상할 수 있다.

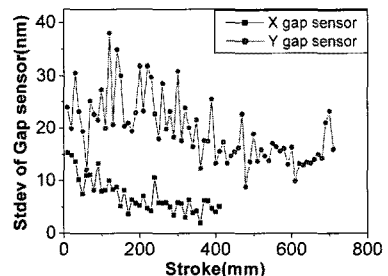


Fig. 11 Standard deviations of perturbations of gap sensors through the full strokes of X and Y direction

Fig. 12 는 직각도 보정을 위하여 기술된 실험 방법에 따라 스테이지가 이동 시 정전용량 센서를 이용하여 기준 사각형 한 면과 인터페로미터에 의

하여 제어되는 스테이지 위치 사이의 상대 변화 값을 10 회 반복하여 측정 한 값 들이다. 그리고, Fig. 12(c)와 (d)에서 나타난 위치 값의 변화 폭은 정전 용량 센서와 스테이지의 오차에 기인한 보정의 불확도로 고려될 수 있다. 이러한 불확도를 줄이기 위하여 10 회 반복 측정하여 획득된 값들을 평균화하였다. 스테이지의 진직도가 완벽히 보정되었 다고 가정했을 때, Fig. 12 에서와 같이 정전용량 센서 에 의하여 측정되는 값의 비선형성은 기준 사각형 의 비선형에 기인한 것으로 추정할 수 있다. 정전

용량 센서의 노이즈와 기준 사각형에 의한 비선형 결과로부터  $\gamma$  를 획득하기 위하여 최소 자승 법을 이용하였다. 최종적으로 얻은 결과 값( $\gamma$ )은 Table 2 에서와 같이 정리된다.  $\gamma$  와 식 (3)을 이용하여 평가된 스테이지의 직각도 오차( $\alpha$ )는  $-0.0408314^\circ$  이다. 이 결과는 1000mm 와 550mm 바 미러가 스테 이지 위에 약  $89.9592^\circ$  로 조립되었음을 표현한 다.

Table 2 Angle ( $\gamma_k$ ) between the reference plane of the bar mirror and of a plane of the polygon

$\gamma_1$	0.000876145556
$\gamma_2$	-0.00016278375
$\gamma_3$	-0.0004670075
$\gamma_4$	0.0011728
$\gamma_5$	0.0007377675
$\gamma_6$	-0.000019153
$\gamma_7$	0.0007368525
$\gamma_8$	-0.00002405075

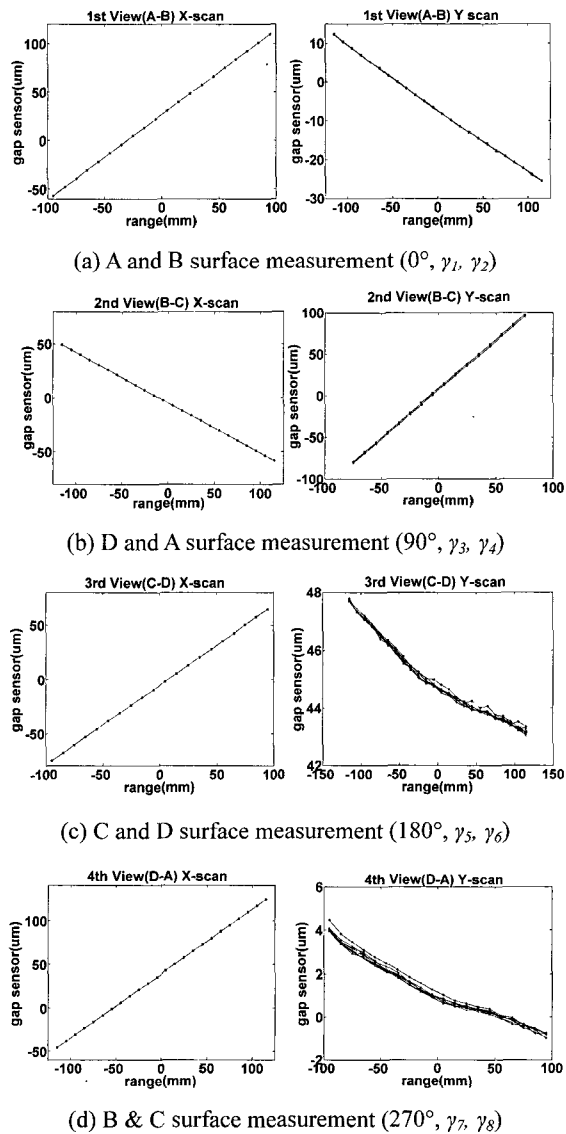


Fig. 12 Results of orthogonality calibration

### 5.2 Evaluation

보정 결과를 통하여 확보된 오차 보정용 데이 터를 ACS 사의 SpiiPlus 실시간 모션 제어기에 입 력하여 시스템 평가를 수행하였다.<sup>12</sup> 제어기에 입 력되는 보정용 데이터의 생성은 첫째, 코사인 오 차에 의한 선형 성분 값을 보정하고, 둘째, X 와 Y 의 진직도의 보정 데이터를 입력한 후, 최종적으 로 직각도 오차에 해당되는 성분을 합하여 이루어 진다.

3.1 장에서 설명되었듯이 회전 오차와 진직도 보 정 후, Renishaw 레이저 측정 장치를 이용하여 회전 오차와 진직도 성능을 평가한 결과 각각  $\pm 0.1$  arcsec 와  $0.8\mu\text{m}(Y)$ ,  $0.5\mu\text{m}(X)$  범위 내의 값을 얻었 다.

직각도에 대한 확인은 LCD(Liquid Crystal Display)제작에 사용되는  $\pm 0.5\mu\text{m}$  정렬 정밀도를 갖 는 Nikon 노광기에 의하여 직각도 검증용으로 생 성된  $300 \times 400\text{mm}^2$  글래스를 이용하였다. 이 때, TFT 글래스의 패턴을 인식하기 위하여  $44\mu\text{m} \times 44\mu\text{m}$  픽 셀 크기의 CCD 와 50 배 광학렌즈가 적용되어 220nm 의 분해능을 갖는 광학 시스템이 활용되었 다. 광학 시스템은 Fig. 1(a)에 표시되지 않은 스테 이지 시스템 석정반 위 다리 모형 구조물 중앙에

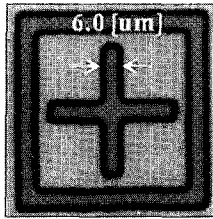


Fig. 13 60 $\mu$ mX60 $\mu$ m cross mark (each one located at four corners of the patterned glass)

설치되며 평가 순서는 다음과 같다.

첫째, 가공된 글래스가 완벽하다고 가정하고 스테이지를 글래스 상에 있는 Fig. 13 에서 보여 지는 마크(60 $\mu$ mX60 $\mu$ m, line width=6 $\mu$ m)에 정렬한다.

둘째, 스테이지를 마크에서 260mm 떨어진 X 축 상 TFT 글래스 위 동일한 형상의 마크의 중심점을 측정하여 기준마크 대비 Y 축 변화량을 측정한다. Y 좌표 변화량은 3.3 $\mu$ m 이다.

셋째, 위와 동일한 방법으로 Y 축은 340mm 떨어진 위치의 마크 위치를 측정하여 X 좌표의 변화량을 측정한다. X 좌표 변화량은 -0.22 $\mu$ m 이다.

위에서 얻은 값을 활용한 결과 보정된 스테이지는 TFT 글래스와 비교하여 2.48 arcsec 의 예각을 갖는 것으로 나타났다. 직각도 평가 시, 측정 광학 시스템의 분해능 한계로 인하여  $\pm 0.3$ arcsec 의 측정 오차를 수반한다.

보정이 적용된 스테이지의 반복도 평가 결과는 Fig. 14 에서와 같이 X 축 편차는 0.11 $\mu$ m 이며, Y 축은 0.045 $\mu$ m 이다.

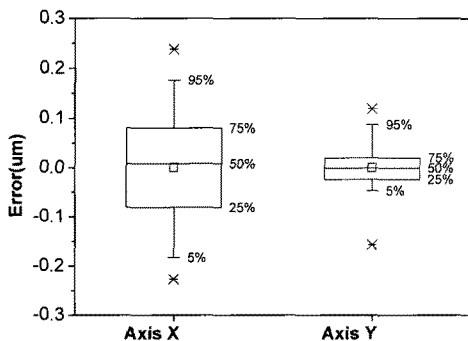


Fig. 14 XY repeatability test with the vision mark

### 6. Conclusion

본 연구에서 3 개의 인터페로미터 위치 센서로 구성된 공기베어링 스테이지가 구현되었다. 공기

베어링 스테이지의 정밀도 향상을 위하여 세 단계의 보정과정을 수행하였다.

첫째, 인터페로미터 헤드의 설치에서 기인한 교사인 오차에 의한 2 arcsec 회전 에러를  $\pm 0.1$  arcsec 로 향상시켰다.

둘째, 시스템 에러 성분 중 바 미러 휨에 의하여 발생하는 비선형적인 성분, 즉, 스테이지의 진직도를 반전법을 이용하여 보정하였다. 보정 후, 스테이지의 진직도는 0.8 $\mu$ m(Y), 0.5 $\mu$ m(X)가 되었다.

마지막으로 스테이지 직각도는 기준 사각형과 자가보정법을 이용하여 -0.0408314°의 오차를 확인하고 보정을 수행하였다. 보정된 스테이지를 마스터로 가정된 TFT 글래스로 검증한 결과, 보정 전 직각도 -0.04°는 2.48 arcsec 로 향상됨으로써 본 논문에서 제안된 보정 기법의 타당성을 확인하였다.

### 참고문헌

1. Slocum, A. H., "Precision machine design," Prentice-Hall, pp. 58-113, 1992.
2. Evans, C. J. and Hocken, R. J., "Self-calibration: reversal, redundancy, error separation and absolute testing," CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 45, No. 2, pp. 617-634, 1996.
3. Hocken, R. J. and Borchardt, B. R., "On characterizing measuring machine geometry," National Bureau of Standards Information Report, NBSIR 79-1752, 1979.
4. Lieberman, B., "Quality assurance procedures for MEBES," J. Vac. Sci. Technol., Vol. 15, No. 3, pp. 913-916, 1978.
5. Rough, M. R., "Absolute 2-D sub-micron metrology for electron beam lithography," Proc. of SPIE, Vol. 480, pp. 145-162, 1984.
6. Rough, M. R., "Absolute two-dimensional sub-micron metrology for electron beam lithography: a calibration theory with application," Precision Engineering, Vol. 7, No. 1, pp. 3-13, 1985.
7. Takac, M. T., "Self-calibration in one dimension," Proc. of SPIE, Vol. 2087, pp. 80-86, 1993.
8. Ye, J., Takac, M. and Berglund, C. N., "An exact algorithm for self-calibration of two-dimensional precision metrology stages," Precision Engineering, Vol. 20, No. 1, pp. 16-32, 1997.
9. Hume, K. J., "Metrology with autocollimators,"

- Hilger & Watts, Lts., 1965.
10. Ruijl, T., "Ultra Precision Coordinate Measuring Machine; Design, Calibration and Error. Compensation," Ph. D. Thesis, Mechanical Engineering, Delft University of Technology, 2001.
  11. Renishaw, <http://www.renishaw.com/>
  12. ACS, <http://www.acsmotioncontrol.com/>
  13. Lion, <http://www.lionprecision.com/>
  14. Obishi, <http://www.obishi.co.jp/>
  15. Park, S.-H. Kim, D., Kim, K. H. and Jang, S., "Calibration of the straightness and orthogonality of a laser feedback stage system using self-calibration method," Proc. of ICPT, pp. 173-178, 2008.