

스캐닝 방식 XY 스테이지의 운동오차 분석

황주호*, 박천홍, 이찬홍(KIMM), 김동익(금오공대 대학원), 김승우(KAIST 기계공학과)

The Analysis of Motion Error in Scanning Type XY Stage

J. Hwang, C.H. Park, C.H. Lee (KIMM), D.I. Kim(Kumoh Univ.), S.W. Kim(KAIST)

ABSTRACT

The scanning type XY stage is frequently used these days as precision positioning system in equipment for semiconductor or display element. It is requested higher velocity and more precise accuracy for higher productivity and measuring performance. The position accuracy of general stage is primarily affected by the geometric errors caused by parasitic motion of stage, misalignments such as perpendicular error, and thermal expansion of structure. In the case of scanning type stage, H type frame is usually used as base stage which is driven by two actuators such as linear motor. In the point view of scanning process, the stage is used in moving motion. Therefore, dynamic variation is added as significant position error source with other parasitic motion error. Because the scanning axis is driven by two actuators with two position detectors, 2 dimensional position errors have different characteristic compared to general tacked type XY stage.

In this study 2D position error of scanning stage is analyzed by 1D heterodyne interferometer calibrator, which can measure 1D linear position error, straightness error, yaw error and pitch error, and perpendicular error. The 2D position error is evaluated by diagonal measurement (ISO230-6). The yaw error and perpendicular error are compensated on the base stage of scanning axis. And, the horizontal straightness error is compensated by cross axis compensation. And, dynamic motion error in scanning motion is analyzed.

Key Words : 스캐닝 방식 스테이지(Scanning type stage), 리니어모터(Linear motor), Yaw 운동오차(Yaw motion error), 위치결정정도(Positioning accuracy), 대각 측정(Diagonal measurement)

1. 서론

초정밀 XY 스테이지는 반도체나 디스플레이 장비의 정밀 위치결정 시스템으로 사용되고 있으며, 보다 높은 생산성과 정밀도를 만족하기 위하여 높은 속도와 정밀도가 요구되고 있다. 이를 만족하기 위하여 운동중에 패턴의 형성 또는 측정을 목적으로 스캐닝 방식의 스테이지를 주로 사용한다. 스캐닝 방식의 스테이지는 H 형의 구조를 가지고 있어 일반적인 적층형 구조의 XY 스테이지와 상이한 기하학적 오차 모델을 가지고 있으며, 그 보정 방법 또한 차이가 있다. 또한, 스캐닝 스테이지는 연속적인 운동을 하면서 사용되는 공정에 적용되기 때문에, 동적인 변동에 의하여 생기는 오차에 대한 고려가 필요하다. 일반적인 적층형의 스테이지에 비하여 두개의 리니어 모터로 구동되기 때문에 스캐닝 방향의 동기제어 오차는 **base stage** 의 동적으로 변동하는 **Yaw** 오차를 유발하게 된다. 본 논문에서

스캐닝 방식 스테이지의 2D 의 위치오차 모델을 정립하였으며, 이를 기하학적 오차의 보정에 활용하였다. 2D 오차 보정은 기존의 XY 좌표에 대한 오차를 측정하여 보정하는 방식과 달리 오차를 일으키는 성분 중 **pitch** 를 제외한 **yaw**, 직각도, **straightness** 오차를 각각 측정하고 보정하였으며, **Diagonal measurement** 방식을 이용하여 그 유효성을 검증한 결과 300mm×300mm 에 대하여 1.6 μ m 의 위치결정 정밀도를 획득 할 수 있었다. 또한, 스캐닝 운동중 발생하는 동적운동 오차에 대한 운동모델을 구하여 이에대한 기초 분석을 수행 하였다.

2. 스캐닝 방식 스테이지의 구성

실험에 사용된 스테이지는 Fig.1 와 같은 구조를 가지고 있으며 저중심 고속화 구조를 위해 H 형 구조로 되어 있다. 2 개의 리니어모터에 의해 구동되는 베이스 스테이지는 스캔(Y)방향으로 움직이며,

이송 테이블이 base stage 위를 스텝(X)방향으로 상대운동하여 움직인다. 또한 모든 축의 수직방향의 구속은 진공예압형의 공기베어링을 사용하였으며 정반면을 안내면으로 사용하여 이송위치에 따라 처짐이 없는 경량형 구조가 가능하도록 설계하였다. 열변형 등에 의한 과구속을 없애기 위하여 base stage 의 두개의 리니어모터 구동축 중 한쪽을 Fig. 1 에 보이는 바와 같이 다공질 공기정압베어링을 이용한 안내면을 사용하였으며 두 개의 리니어모터 중 수평방향의 안내면이 있는 축을 Master 축(y1) 반대편축이 Slave 축(y2)으로하여 동기제어되어 움직인다.

리니어모터는 Trilogy 사의 LM310-4, 위치검출 장치는 HiedenHain 사의 LIP401 모델을 사용하였다. 제어기는 Delta tau 사의 Turbo-Pmac2 를 사용하여 상위제어기에서 위치오차에 대한 PID 제어 및 commutation 을 수행하였다.

3. 스테이지의 2D 위치 오차 모델

일반적인 적축형 XY 스테이지의 2D 위치오차는 식(1)로 표현된다.¹ 여기서 ϵ 는 회전운동이며 아래 첨자 x,y,z 가 오른손법칙으로 회전중심 축을, 첨자 1,2 는 각각 base stage 와 위에 적층된 스테이지를 나타낸다. δ 는 스케일 자체의 오차와 크로스축의 진직도 오차에 의한 직선운동오차를 나타낸다.

$$\begin{bmatrix} \delta P_x \\ \delta P_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -t_y(\epsilon_{z1} + \epsilon_{z2}) + t_z(\epsilon_{y1} + \epsilon_{y2}) - b_2\epsilon_{z1} \\ +c_2\epsilon_{y1} - a_2(1 - \cos\theta_{12}) + \delta x_1 + \delta x_2 \\ t_x(\epsilon_{z1} + \epsilon_{z2}) - t_z(\epsilon_{x1} + \epsilon_{x2}) + a_2\epsilon_{z1} \\ -c_2\epsilon_{x1} + a_2 \sin\theta_{12} + \delta y_1 + \delta y_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

또한 a,b,c는 각각 x,y,z 방향으로의 이송량이며, t는 측정대상의 위치를 나타낸다. 본 실험에 사용된 스캐닝 스테이지의 경우 두 스테이지 간의 간섭이 없는 부분이 있어 간략화가 가능하며 식(2)와 같이 된다.

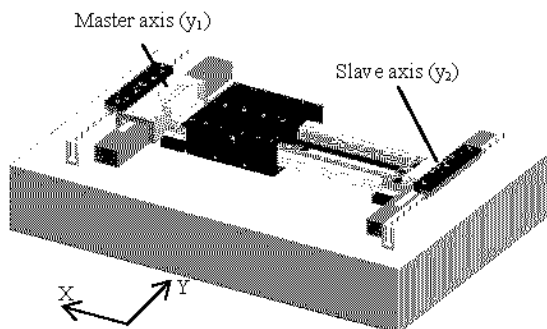


Fig. 1 Schematic diagram of Scanning type XY Stage

$$\begin{bmatrix} \delta P_x \\ \delta P_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -t_y(\epsilon_{z1} + \epsilon_{z2}) + t_z\epsilon_{y2} - a_2\epsilon_{z1} + \delta x_1 + \delta x_2 \\ t_x(\epsilon_{z1} + \epsilon_{z2}) - t_z\epsilon_{x2} + a_2\theta_{12} + \delta y_1 + \delta y_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

4. 정적 2D 위치오차 측정 및 보정

2D 위치오차는 diagonal measurement(ISO230-6)과 다른 운동오차를 이용하여 평가하였으며 레이저간섭계(HP34970A)를 이용하여 측정하였다. 일반적으로 diagonal measurement는 식(1)의 여러 오차가 서로 상쇄되어 2D 오차를 나타내지 못하는 경우가 지만, 각 축에 대한 오차를 검증하면 이러한 문제를 해결하는 것이 가능하다.² 평가 및 보정은 1) base stage 의 yaw 오차의 측정 및 보정 2) 베이스 스테이지의 마스터(y1) 및 슬레이브(y2)축의 오차 측정 및 보정 3) X 축 스테이지의 Y 위치 별 오차 측정 및 보정 4) 직각도 오차측정 및 보정 5) 교차축의 수평방향 진직도 및 직각도 오차에 의한 위치오차 보정 순으로 수행하였다.

식(2)에서부터 기하학적 오차중 가장 영향계수가 큰 것은 base stage 의 yaw 오차(ϵ_{z1})가 된다. 2개의 리니어스케일에 의하여 제어되기 때문에 ϵ_{z1} 의 크기가 작지만 리니어스케일 설치 오차 및 자체의 오차에 의하여 Fig. 2 의 상단에 보이는 바와 같은 yaw 오차를 보인다. 이는 마스터축(y1)과 슬레이브축(y2)간의 상대위치를 보정하여 Fig. 2 하단에 나타난 바와 같이 보정하여 그 크기를 0.29arcsec 로 줄일 수 있음을 확인하였다. 두번째로 y1 및 y2 축의 오차를 두개의 레이저 간섭계 시스템을 이용하여 base stage 의 두개의 리니어 스케일 부분에 각각 장착하여 base stage 의 오차를 측정하였다. Base stage 에서의 보정 효과를 위치결정에 대상이 되는 이송 테이블의 중앙 지점에 위치하여 보정의 효과를 살

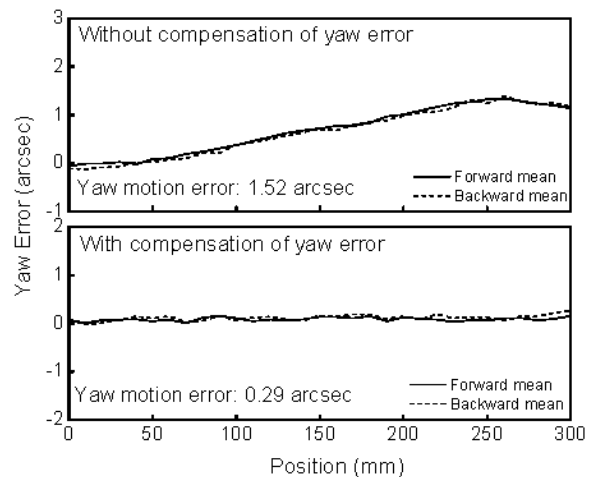


Fig. 2 Compensation of yaw error in base stage

퍼 본 결과를 Fig. 3 도시하였으며 양호한 보정결과를 보이고 있음을 알 수 있다. X 축의 위치오차는 식(2)에서 나타낸 여러 오차 성분 중 정반편을 안 내면으로 하여 이송하기 때문에 X 축의 위치뿐만 아니라 Y 축의 위치에 따라 달라 지게 된다. 본 연구에 적용된 스테이지의 경우 테이블의 크기가 정 방향으로 270mm 가량 되기 때문에 300mm의 stroke에 대하여 Y 방향으로 150mm 씩 이동하면서 측정을 하였고, 그 사이 값의 오차는 직선 보간을 하도록 하였다.

이상의 Fig. 2 와 Fig. 3 의 측정 및 보정 결과는 각각의 위치의 1D Position 데이터이다. 따라서 측정된 오차는 식(2)의 앞의 2 개의 항에 대하여 나타낸 값이며, 2D 오차를 평가하기 위하여 (0,0)지점에서(300,300) 지점으로 (300,0)지점에서 (0,300)지점으로 X 및 Y 방향 좌표로 각각 10mm 씩 이동하면서 측정하는 diagonal measurement를 수행한 결과를 Fig. 4 에 도시하였다. 그림에 보이는 바와 같이 두 방향에 대하여 유사한 크기와 반대의 부호를 가지고 있음을 알 수 있다. 이는 직각도 오차에 의한 결과이며 이는 식(3)에 의하여 그 크기를 구할 수 있다.

$$L_d^2 = L_x^2 + L_y^2 + 2L_xL_y \cos\theta_{12} \quad (3)$$

그림에서 L_d 는 diagonal measurement에서 측정된 오차, L_x 는 x 방향으로의 이동거리, L_y 는 y 방향으로의 이동거리, θ_{12} 는 두축 간의 직각도 오차이다. 이

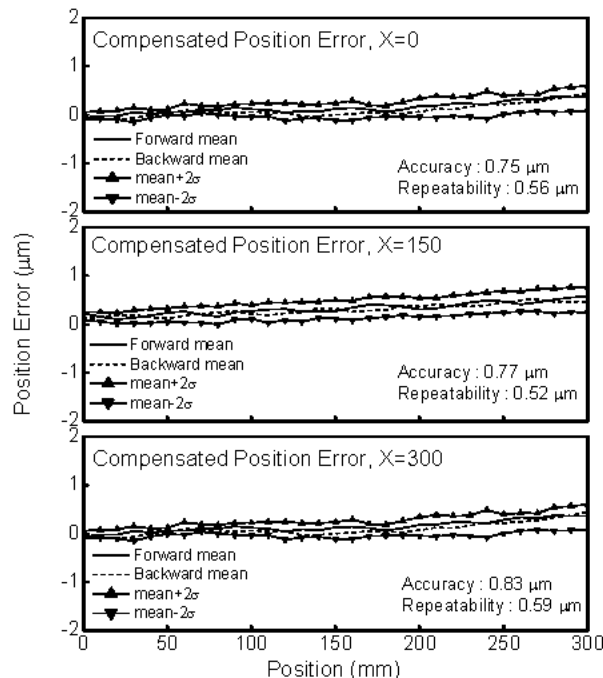


Fig. 3 Positioning accuracy of position error of moving table in scan axis(Y)

렇게 하여 구한 직각도 오차는 L_x, L_y 를 300 L_d 를 424.51451로 하였을 때 243.5arcsec가 되며 이는 y_1 에 대한 y_2 의 상대 운동을 움직여서 보정이 가능하나, 수평 방향의 베어링이 이러한 크기를 흡수할 수 없으므로, Fig.1의 Master 부분의 볼트 연결부를 조절하여 보정을 수행하였으며 최종적으로 직각도 측정 optic을 이용하여 검증한 결과 1.06arcsec까지 보정이 가능하였다. 이를, y_2 축의 상대운동을 통하여 최종적으로 보정한 결과를 Fig. 5에 도시하였으며, 잔류된 직각도는 0.37arcsec이다.

직각도 오차를 보정한 후에도 Fig. 5에서 보이는 바와 같은 곡선의 모양이 있음을 알 수 있으며 식(2)의 오차 성분 중 보정이 되지 않은 상대 축의 수평방향 진직도 임을 알 수 있다. 이는 실제의 진직도를 측정하여 상대편의 위치오차를 보정하여 직각도 오차가 보정이 Fig. 6에 보이는 바와 같이 0.5µm 이내로 보정하는 것이 가능하며, 이러한 보정을 수행한 후에 Fig. 7와 같은 1.6µm 이내의

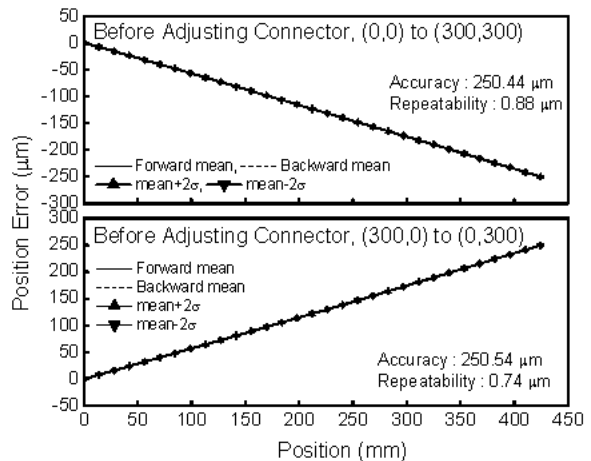


Fig. 4 Position error on diagonal measurement

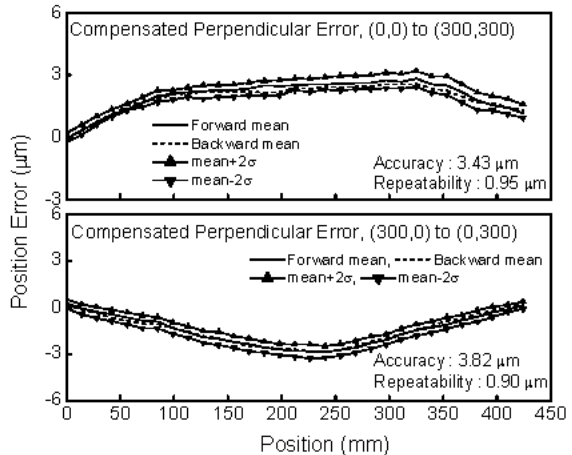


Fig. 5 Position error on diagonal measurement after compensating perpendicular error

diagonal 오차가 달성 가능함을 확인 하였다.

5. 동적 오차

스캐닝 모션에서 이송테이블은 X(Step)방향으로 정지되어 있는 상태에서 Y(scan)방향으로 등속운동을 한다. 따라서, 동적 오차는 두 개의 리니어모터로 구동되는 식(2)의 yaw 오차 ε_z 에 의하여 주로 생김며, 4 장의 기하학적 오차에 더하여지게 된다. Base stage 의 동적 운동은 식(3)에 의하여 표현된다. 여기서 u_1 및 u_2 는 base stage 양측에 작용하는 힘이며, L_1, L_2 는 각각 수평 지지베어링에서부터 master 및 slave 축의 리니어모터 까지의 거리, l 은 base stage 의 두개의 리니어 스케일 간의 거리, K_m 은 수평방향 공기정압 베어링의 모멘트 강성, m 은 스테이지의 질량, c 는 댐핑계수가 된다.

$$v_1 = \dot{y}_1, v_2 = \dot{y}_2, (u_1 + u_2) = \frac{m}{2}(\dot{v}_1 + \dot{v}_2) - \frac{c}{2}(v_1 + v_2) \quad (3)$$

$$L_1 u_1 - L_2 u_2 = I_z \frac{(\dot{v}_1 - \dot{v}_2)}{l} + \frac{K_m(y_1 - y_2)}{l}$$

여기서부터, 상태공간 방정식을 도출하면 식(4)와 같이 구하여 진다.

$$\dot{X} = AX + BU, Y = CX \quad (4)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{K_m}{2I_z} & \frac{K_m}{2I_z} & -\frac{c}{2m} & -\frac{c}{2m} \\ \frac{K_m}{2I_z} & -\frac{K_m}{2I_z} & -\frac{c}{2m} & -\frac{c}{2m} \end{bmatrix}$$

$$B = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 2 & L_1 l \\ \frac{2}{m} + \frac{L_1 l}{I_z} & \frac{2}{m} - \frac{L_2 l}{I_z} \\ \frac{2}{m} - \frac{L_1 l}{I_z} & \frac{2}{m} + \frac{L_2 l}{I_z} \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

이로부터 구한 전달함수 $G(s)$ 는 식(5)와 같다.

$$G(s) = C(sI - A)^{-1} \quad (5)$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{(2I_1 + L_1 l m)s^2 + cL_1 l s + 2K_m}{S(mI_1 s^3 + cI_1 K_m s^2 + mK_m s + cK_m)} & \frac{(2I_1 - L_2 l m)s^2 - cL_2 l s + 2K_m}{S(mI_1 s^3 + cI_1 K_m s^2 + mK_m s + cK_m)} \\ \frac{(2I_1 - L_1 l m)s^2 - cL_1 l s + 2K_m}{S(mI_1 s^3 + cI_1 K_m s^2 + mK_m s + cK_m)} & \frac{(2I_1 + L_2 l m)s^2 + cL_2 l s + 2K_m}{S(mI_1 s^3 + cI_1 K_m s^2 + mK_m s + cK_m)} \end{bmatrix}$$

위의 전달함수로부터 Master 및 Slave 축의 운동오차가 다름을 알 수 있으며 이의 영향에 대한 보정 기법이 필요 함을 알 수 있으며, 이에 대한 연구를 향후 진행할 계획이다.

6. 결론

스캐닝 방식 스테이지에 대한 이론 및 실험적 분석을 통하여 스캐닝 방식 스테이지의 운동오차에 의한 2D 위치오차 모델을 정립하였으며 운동오차의 보정을 통하여 1.6 μ m 의 diagonal 위치오차까지 보정됨을 확인하였다. 또한, 스캐닝 모션중 발생하는 동적오차에 대한 모델을 세웠으며 이에 대한 검증 및 제어기법에 대한 연구를 진행할 계획이다.

참고문헌

1. A.H. Slocum, Precision Machine Design, Prentice Hall, 1992.
2. Mark A. V. Chapman, "Limitations of laser diagonal measurements," Precision Engineering, Vol. 27, pp. 401-406, 2003.

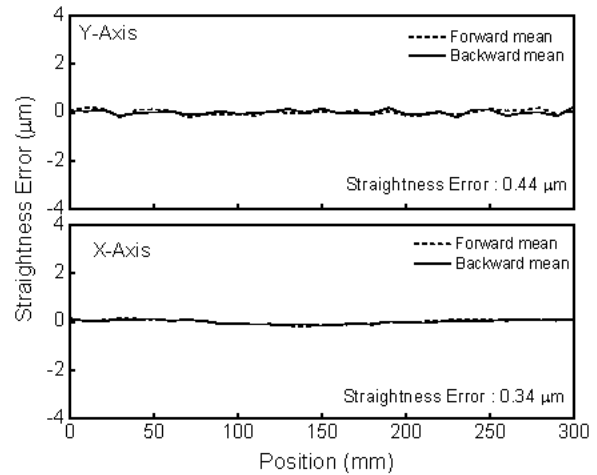


Fig. 6 Compensation effect of straightness error

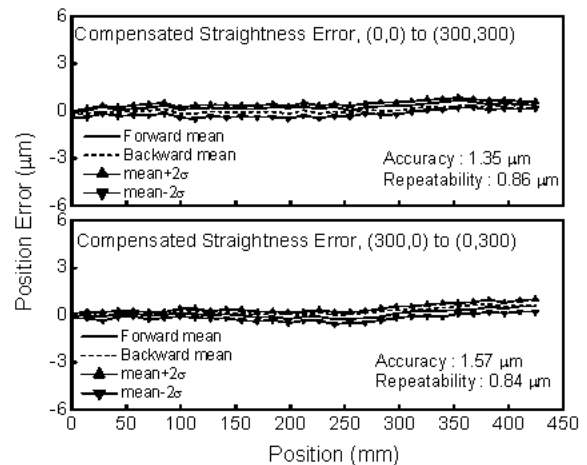


Fig. 7 Position error on diagonal measurement after compensating straightness error