

초정밀 리니어 스테이지의 운동오차 측정방법

Measurement Method of Motion Errors in Ultra Precision Linear Stage

*김인동¹, 신동익¹, 장재호¹, #한성수²

*I. D. Kim¹, D. I. Shin¹, J. H. Jang¹, #C.S.Han(cshan@hanyang.ac.kr)²

¹ 한양대학교 기계공학과 ² 한양대학교 기계정보경영학부

Key words : Linear Stage, Capacitance Sensor, Reversal Method, Straightedge

1. 서론

세계적으로 평판디스플레이, 반도체, 초정밀 광부품 및 차세대 IT 제품의 생산 장비에서 초정밀 위치 제어가 필요하므로, 이를 위한 스테이지의 중요성이 커지고 있다. 위치결정 스테이지의 정밀도 향상을 위해서는 스테이지의 성능을 측정하고 평가하는 기술이 필연적으로 함께 요구된다.

현재 스테이지의 운동오차를 측정할 수 있는 방법으로는 레이저 간섭계, 오토콜리메이터, 정전용량센서 등을 이용하고 있는데, 레이저간섭계나 오토콜리메이터는 고가이고 광학계를 설치하고 정렬하는데 어려움이 많다.^{1,2} 이런 이유로 권성환 등은 비교적 저가인 정전용량센서만 이용해서 5 자유도 운동오차(error motion)를 측정하는 시스템을 개발하였으나³, 참조면의 형상오차(profile error)를 분리하지 않았기에 엄밀히 운동오차로 볼 수 없고⁴, 따라서 그 정밀도에 한계가 있다. 본 연구에서는 정전용량센서만 이용하여 선형축의 5 자유도 운동오차의 측정하되, 반전법(reversal method)을 이용해 참조면의 형상오차를 측정·분리할 뿐만 아니라 그 측정값을 이용해 성능을 간접적으로 평가할 수 있는 방법을 제안한다.

2. 측정 방법

초정밀 스테이지의 5자유도 운동오차는 한번에 모든 운동오차를 측정하기가 어려우므로 본 연구에서는 반전법과 센서 2개를 이용하여 5개의 운동오차를 분리하였다. 스테이지의 반복 정밀도가 우수하기 때문에 반전법을 적용하여도 높은 정밀도를 가지면서 운동오차를 측정할 수 있다.

2.1 수직 반전법 (Vertical Reversal Method)

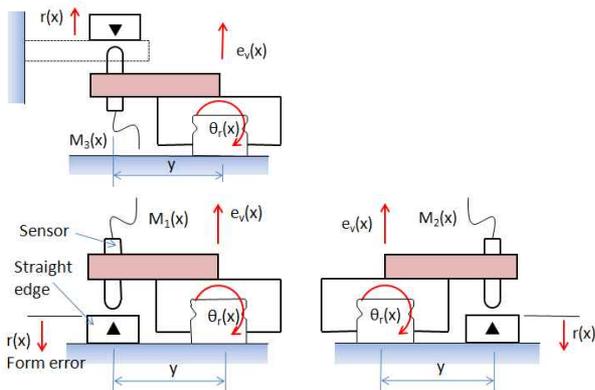


Fig. 1 Measuring principle of the vertical reversal method

Fig.1 은 3개의 방향에서 운동오차를 측정하는 수직 반전법을 보여주고 있다. 처음에 왼쪽 아랫방향에서 측정을 하고, 왼쪽 윗방향, 오른쪽 아랫방향으로 2번 반전을 시켜 운동오차를 측정한다. 반전 전후의 측정된 센서의 값을 $M_1(x)$, $M_2(x)$, $M_3(x)$ 라 하고, 참조면의 형상오차를 $r(x)$, 스테이지의 수직운동오차와 롤(Roll)오차를 $e_v(x)$, $\theta_r(x)$, 스테이지의 중심에서 참조면(Straightedge)의 중심까지의 거리를 y 라 하면 다음식과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} M_1(x) &= r(x) + e_v(x) + y\theta_r(x) \\ M_2(x) &= r(x) + e_v(x) - y\theta_r(x) \\ M_3(x) &= r(x) - e_v(x) - y\theta_r(x) \end{aligned} \quad (1)$$

식 (1)을 연립하여 정리하면 롤오차, 형상오차, 수직운동오차를 다음과 같이 분리 할 수 있다.

$$\begin{aligned} \theta_r(x) &= \frac{1}{2y}(M_1(x) - M_2(x)) \\ r(x) &= \frac{1}{2}(M_1(x) + M_3(x)) \\ e_v(x) &= \frac{1}{2}(M_2(x) - M_3(x)) \end{aligned} \quad (2)$$

2.2 수평 반전법 (Horizontal Reversal Method)

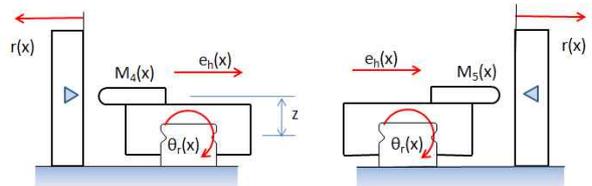


Fig. 2 Measuring principle of the horizontal reversal method

Fig. 2 은 수평방향에서 운동오차를 측정할 수평반전법⁵을 보여주고 있다. 처음에 왼쪽에서 측정한 후 반전시켜 오른쪽에서 측정한다. 반전 전, 후의 센서의 측정값을 M_4 , M_5 , 수직운동오차를 e_h , 스테이지 중심에서 센서 중심까지의 높이를 z 라 하면 다음식과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} M_4(x) &= r(x) + e_h(x) + z\theta_r(x) \\ M_5(x) &= r(x) - e_h(x) - z\theta_r(x) \end{aligned} \quad (3)$$

식 (3)을 연립하여 정리하면 다음식과 같다.

$$\begin{aligned} r(x) &= \frac{1}{2}(M_4(x) + M_5(x)) \\ e_h(x) &= \frac{1}{2}(M_4(x) - M_5(x)) - z\theta_r(x) \end{aligned} \quad (4)$$

식 (4)에서 또 하나의 참조면의 형상오차를 구할 수 있지만 수평운동오차는 롤오차를 알아야 분리할 수 있다. 롤오차는 수직 반전법에서 구하였기 때문에 수평방향 운동오차를 구할 수 있다. 수직·수평 반전법에 의해 2개의 참조면의 형상오차, 수직·수평 운동오차, 롤오차를 구하였다.

2.3 요(Yaw), 피치(Pitch)오차 측정

요오차와 피치오차를 구하기 위해서 정전용량센서 2개를 이용하여 측정하였다. 수평 반전법의 반전 전의 위치에서 수평방향으로 센서 2개를 Δx 간격으로 설치하고 첫번째 센서 위치를 x_i , Δx 만큼 떨어진 센서 위치를 x_{i+1} 이라 한다. x_i , x_{i+1} 에서 측정된 센서 값을 $M_6(x_i)$, $M_7(x_{i+1})$ 라 하면 다음식과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} M_6(x_i) &= r(x_i) + e_h(x_i) + z\theta_r(x_i) \\ M_7(x_{i+1}) &= r(x_{i+1}) + e_h(x_{i+1}) - \Delta x\theta_y(x_i) \end{aligned} \quad (5)$$

식 (5)를 연립하여 정리하면 다음식과 같다.

$$\Delta x\theta_y(x_i) = M_6(x_i) - M_7(x_{i+1}) + r(x_{i+1}) - r(x_i) \quad (6)$$

식 (6)에서 형상오차 $r(x)$, $r(x_{i+1})$ 를 알 수 있다면 yaw오차를 분리할 수 있다. 형상오차는 반전법에 의해서 구했기 때문에 요오차를 구할 수 있다. 수직 반전법의 반전 전 위치에서 센서 2개를 이용하여 요오차를 구한 방법과 똑같이 적용하면 피치오차도

구할 수 있다. 따라서 정전용량센서 2개를 이용하여 요·피치오차를 구하였다.

2.4 측정전략 및 평가방법

3가지 측정방법에 의해 5개의 운동오차를 모두 구하였는데, 구해진 운동오차값들은 각각 독립적으로 구해진 값도 있지만 전체적으로 상관관계를 유지하면서 구해진 값이다. 수평운동오차는 수직 반전법에서 구해진 롤오차를 이용하였고, 요·피치오차는 반전법에서 구해진 참조면의 형상오차를 이용하여 구했다. 따라서 수직·수평 반전법에서 구해진 2개의 참조면의 형상오차를 비교하여 5개의 운동오차의 정밀도를 간접적으로 검증하였다.

3. 실험 및 결과



Fig. 3 System of measurement

Fig. 3은 측정 시스템의 전체적인 모습이다. 리니어 모터 (Triology 310M)를 이용하여 제작된 스테이지(0.02 μ m 분해능, $\pm 0.1\mu$ m 반복 정밀도)를 사용하였고, 스테이지 컨트롤러는 U-MAC(Delta tau)을 사용하였다. 센서 지그는 알루미늄소재를 이용하여 자체적으로 설계하여 제작했고, 정전용량센서(Micro sense 4810, ADE, 1nm 분해능), 참조면(RSK, 평탄도 $\pm 0.2\mu$ m /500mm)을 사용하였으며, 참조면을 지지 하기위해서 block을 이용하였다.

리니어 스테이지의 속도를 14mm/s, 측정거리는 77mm 하였으며, 측정 시스템의 기하학적 치수로 $\Delta x = 14mm$, $y = 144mm$, $z = 105.5mm$ 하였다. 샘플링 시간을 0.001초로 하여 Δx 간격마다 1000개의 데이터를 획득하였다.

실험은 3가지 측정방법마다 10번씩 측정을 하여, 데이터의 평균값을 가지고 결과를 분석 하였다.

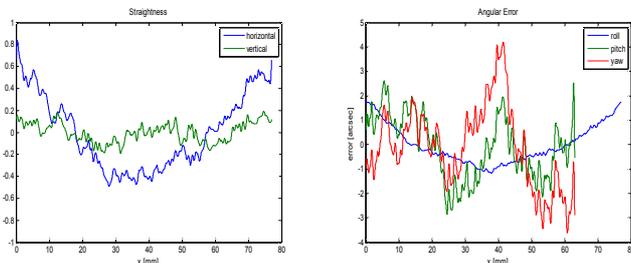


Fig. 4 Results of five error motion

Fig.4은 제안한 측정방법을 이용하여 계산되어 얻어진 오차요소들의 결과값을 보여준다. 특히, 기존 스테이지와 유사하게 롤오차는 매우 작게 나타나고 있다.

Table 1은 5개의 운동오차와 형상오차를 수치적인 결과값으로 정리하였다.

Table 1 Results of 5 motion errors and profile error

Error		Value
Straightness (nm)	Horizontal	± 664
	Vertical	± 191
Angular (arcsec)	Roll	± 1.46
	Pitch	± 2.73
	Yaw	± 3.91
Profile (nm)		± 194

수직·수평 반전법에 의해 구해진 2개의 참조면의 형상오차를 fig. 5에서 보여준다. 이 2개의 형상오차의 비교를 하여 표준편차($\pm 2\sigma$)를 이용한 측정 정밀도는 $\pm 93nm$ 임을 알 수 있었고, 이것으로 알고리즘상의 상관관계를 통해 5개의 운동오차의 정밀도를 간접적으로 평가할 수 있었다.

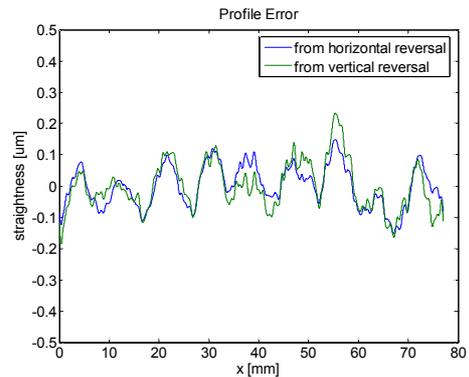


Fig. 5 Profile error of straightedge

4. 결론

본 연구는 초정밀 리니어 스테이지의 5개의 운동오차를 측정하기 위한 측정 방법으로 새로운 측정 알고리즘을 제안하였다. 이 측정 알고리즘은 레이저 간섭계와 같은 고가의 장비를 사용하지 않고, 정전용량센서를 이용하여 적은 시간과 노력으로 쉽게 측정할 수 있다. 특히, 3가지 측정방법 중 수직·수평 반전법에서 구해진 2개의 참조면의 형상오차를 비교함으로써 5개의 운동오차의 정밀도를 간접적으로 평가 하여 측정방법의 유용성을 검증하고자 했다. 이 측정시스템을 이용한 실험결과 $\pm 93nm$ 의 측정 정밀도를 갖음을 간접적으로 알 수 있었다.

후기

본 연구는 산업자원에서 지원하는 ‘성장동력, 중기거점/차세대신기술개발’ 사업 중 ‘차세대 IT제품 생산을 위한 초정밀 로봇 기반 기술 개발’ 과제로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Jenq Shyong Chen, Tzu Wei Kou, Shen Hwa Chiou, "Geometric error calibration of multi-axis machines using as auto- alignment laser interferometer", Precision Engineering 23 (4), 243-252, 1999
2. Guiquan Chen, Jingxia Yuan, Jun Ni, "A displacement measurement approach for machine geometric error assessment", 41 (1), 149-161, 2001
3. 권성환, 임창범, "정전용량센서를 이용한 소형공작기계의 기하학적 오차측정", 한국정밀공학회 춘계학술대회 논문집, 1733-1736, 2005
4. ANSI B89.3.4, "Axes of Rotation: Methods for Specifying and Testing Standard", ANSI/ASME, 2004
5. 오윤진, 박천홍, "초정밀 이송테이블의 5자유도 운동오차 측정", 한국 정밀공학회지, 22 (11), 135-141, 2005