

정전용량센서를 이용한 선형축의 5자유도 오차운동 측정 Measurement of 5-dof Error Motion using Capacitive Sensors

*신동익¹, 김인동¹, #한창수¹, 남경태²

*D. I. Shin¹, I. D. Kim¹, #C. S. Han(cshan@hanyang.ac.kr)¹, G.T.Nam²

¹ 한양대학교 기계공학과, ² 한국생산기술연구원

Key words : error motion, linear axis, capacitive sensor, measurement

1. 서론

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 정전용량 센서만 이용해서 5 자유도 운동오차 (error motion)을 측정하는 시스템을 개발하였으나 [3], 참조면의 형상오차 (profile error)를 분리하지 않았기에 엄밀히 운동오차로 볼 수 없고 [4], 따라서 그 정밀도에 한계가 있다. 오윤진 등은 5자유도 오차운동을 분리하였으나, 여러 가지 센서를 조합해서 측정하였다 [5]. 우리는 지난 연구를 통해 정전용량센서만 이용하여 선형축의 5 자유도 운동오차의 측정하되, 반전법(reversal method)을 이용해 참조면의 형상오차를 측정·분리하고 그 측정값을 이용해 성능을 간접적으로 평가할 수 있는 방법을 제안하였다 [6]. 그러나 이러한 측정을 위해서 5회의 측정을 수행해야 했다. 본 연구에서는, 측정면의 형상 오차를 미리 기억해 둬으로써 측정 횟수를 2회로 줄이는 방법을 제안하였으며, 기존 방법과 성능을 비교하였다.

2. 직교 3점법

정전용량센서 3개를 수평, 수직으로 배열하고 참조면의 상하 두 개의 프로파일을 측정한다. 이런 방식으로 수평, 수직방향에서 두 번의 측정을 통하여 센서값에 대한 여러 오차들과의 관계식이 유도 되고 참조면의 프로파일을 알 수 있다면 스테이지의 5자유도 운동오차를 구할 수 있다. 측정할 참조면이 정해지면 참조면의 프로파일은 항상 고정되어 있으므로 매번 프로파일을 구할 필요가 없어지므로 본 연구에서는 반전법을 통하여 미리 프로파일의 정보를 확보하고 이를 이용하여 수평, 수직 방향에서 두 번의 측정으로 스테이지의 5자유도 운동오차를 구하였다.

Fig. 1은 수평방향 측정을 위한 센서 구성과 측정에 있어서 변수, 오차방향의 정의 및 기호를 나타낸다. δ_y 는 수평 진직도, δ_z 는 수직

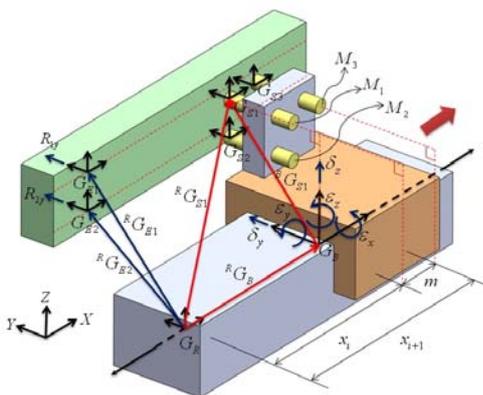


Fig. 1 Sensor configuration for horizontal measurement

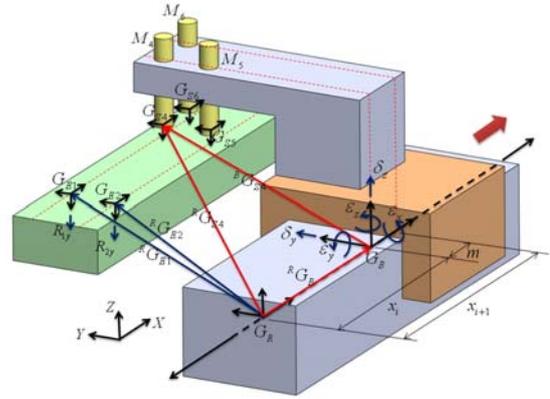


Fig. 2 Sensor configuration for vertical measurement

진직도를 나타내며, $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$ 는 각각 롤(roll), 피치(pitch), 요(yaw)의 회전오차를 나타낸다. 세 센서의 측정값을 M_1, M_2, M_3 라고 하면, 각 측정값은 다음과 같은 성분으로 구성된다.

$$\begin{aligned} M_1(x) &= r(x) - \delta_y(x) \\ M_2(x) &= r(x) - \delta_y(x) - h\epsilon_x(x) \\ M_3(x) &= r(x+h) - \delta_y(x) - h\epsilon_z(x) \end{aligned}$$

여기서 $r(x)$ 는 측정면의 형상이고, h 는 센서 간 간격이다. 여기서 5자유도 오차운동의 기준점은 첫 번째 센서의 팁이고, 기준을 축의 중심이나 다른 데로 옮기려면, 강체 변환을 적용해야 함을 명심해야 한다. 세 측정점이 서로 직교하므로, 이러한 센서 구성을 직교 3점법 (orthogonal three point method)으로 명명하였다.

만약, 측정면의 형상 $r(x)$ 를 알고 있다면, 우리는 식 (1)에서 수평진직도, 요 오차, 롤 오차의 측정 알고리즘을 도출할 수 있다.

$$\begin{aligned} \delta_y(x) &= r(x) - M_1(x) \\ h\epsilon_z(x) &= r(x+h) - r(x) - (M_3(x) - M_1(x)) \\ h\epsilon_x(x) &= M_1(x) - M_2(x) \end{aligned}$$

Fig. 2는 수직방향 측정을 위한 센서 구성과 측정에 있어서 변수를 나타낸다. 세 센서의 측정값을 M_4, M_5, M_6 라고 하면, 각 측정값은 다음과 같은 성분으로 구성된다.

$$\begin{aligned} M_4(x) &= r(x) + \delta_z^*(x) \\ M_5(x) &= r(x) + \delta_z^*(x) - h\epsilon_y(x) \\ M_6(x) &= r(x+h) + \delta_z^*(x) + h\epsilon_z(x) \end{aligned}$$

수평과 달리 수직 진직도에 별표(*)를 붙인 것은 기준점이 서로 다른 것을 강조하기 위해서다. 강체의 회전 변위는 강체 자체에 대해 정의되지만, 강체의 선형 변위는 강체 상의 특정점에 대해 정의되기 때문이다. 수평 측정의 기준점은 M1 센서의 기준점이고 수직 측정의 기준점은 M4 센서의 기준점으로 서로 다르다(그러나, 그 좌표계의 방향은 서로 같다).

수평 측정에서는 수평 진직도, 롤, 요가 관여된 반면에, 수직에서는 수직진직도, 피치, 요가 관여되고, 롤은 두 경우 모두 나타난다. 이 값을 비교함으로써, 측정값의 정밀도를 간접적으로 평가할 수 있다. Fig. 3은 이를 나타내고 있다.

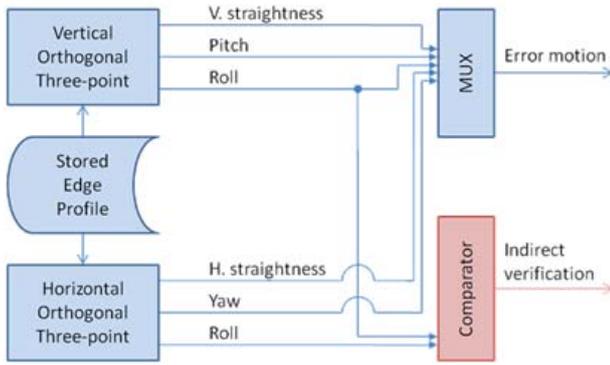


Fig. 3 Data extraction algorithm

3. 측정 시스템 구성

Fig. 4은 스테이지의 5자유도 운동오차를 측정하기 위한 측정 시스템들이다.

측정 센서로는 정전용량센서(ADE 3410, 1 nm 분해능, ±100 μm 측정범위)를 사용하였으며 리니어 엔코더(US disital EM1-0-127)와 리니어 스케일(US disital LIN-80CM, 50 μm 분해능)을 사용하여 분해능 간격으로 측정 데이터를 샘플링하였다. 3개의 정전용량 센서와 리니어 엔코더를 고정시키기 위한 센서지그는 알루미늄 재질로 자체 설계제작 하였으며 참조면(500mm) 또한 철재질의 연마가공을 하여 자체 설계제작 하였다. 참조면의 정밀 위치조정을 위하여 석정반과 마이크로미터(Mitutoyo 150-802)를 이용한 참조면 위치조정기구를 자체 설계제작 하였으며 특히 지면과 완전 접촉을 하도록 3개의 구슬을 이용하여 3점 지지가 되도록 설계하였다. 지그암(Mitutoyo 마그네틱 스탠드 7027-10)을 이용하여 센서지그의 위치를 변경하여 수평, 수직방향측정을 할 수 있도록 하였다.

4. 실험 및 측정 결과 분석

본 연구에서는 참조면의 프로파일을 미리 확보하여 수평, 수직 방향의 두번의 측정으로 5자유도의 운동오차를 구하고자 하였다. 따라서 참조면의 프로파일의 데이터를 얻기위해 반전법을 사용하였다. Fig 5(a)는 이를 나타내고 있다.

리니어 스테이지를 14mm/s의 등속으로 이송시키며, 이송거리를 300mm로 하였다. Fig. 1과 2에서와 같이 수평, 수직방향으로 각각 10 번씩 측정하여 데이터의 평균값을 가지고 결과를 분석하였

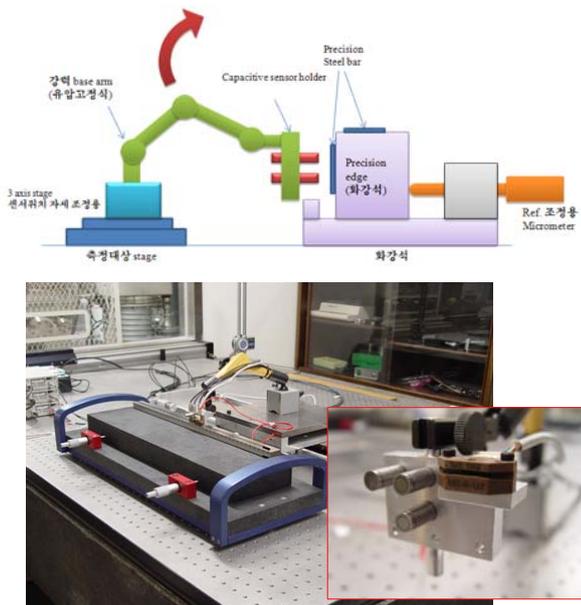


Fig. 4 Implemented measuring system

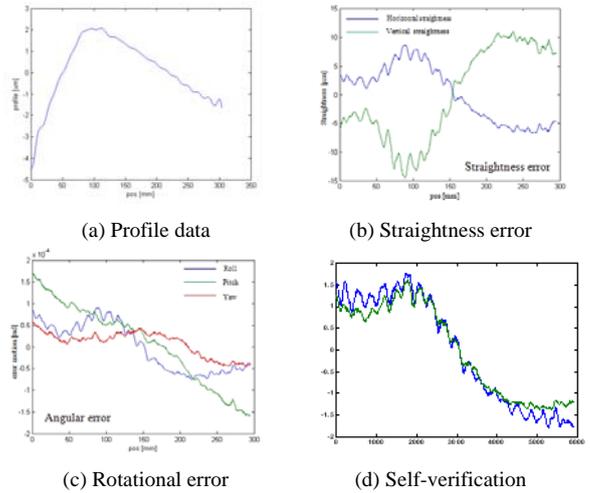


Fig. 5 Experimental result

다. Fig. 5(b), (c)과 Table 1은 제안한 측정 방법을 이용하여 연산되어 얻어진 진직도와 회전오차를 나타내었다.

Table 1 5-DOF error motion of a linear stage

Error motion		Value
Straightness (μm)	Horizontal	±0.7
	Vertical	±0.13
Rotational error (mrad)	Roll	±0.85
	Pitch	±1.6
	Yaw	±0.5

두개의 물오차를 비교하여 표준편차(±3σ)를 이용한 측정 정밀도는 230nm임을 알 수 있었다. 지난 발표[6]에서 구한 정밀도 90nm 보다는 다소 높은 수치이나, 측정 횟수는 5회에서 2회로 줄일 수 있었고, 편의성을 높였다.

5. 결론

본 논문에서는 초정밀 리니어 스테이지의 5자유도 운동오차를 측정하기 위한 측정방법으로 새로운 측정알고리즘을 제안하였다. 3개의 정전용량센서와 리니어 엔코더를 이용하였으며, 자체 알고리즘에 의해 측정된 정밀도는 230 nm이다.

후기

연구는 지식경제부/한국산업기술진흥원 융복합형로봇전문 인력양성사업의 지원으로 수행되었음

참고문헌

- Jenq Shyong Chen, Tzu Wei Kou, Shen Hwa Chiou, "Geometricerror calibration of multi-axis machines using as auto-alignment laser interferometer", Precision Engineering 23 (4), 243-252, 1999
- Guiquan Chen, Jingxia Yuan, Jun Ni, "A displacement measurementapproach for machine geometric error assessment", 41 (1), 149-161, 2001
- 권성환, 임창범, "정전용량센서를 이용한 소형공작기계의 기하학적 오차측정", 한국정밀공학회 춘계학술대회 논문집, 1733-1736, 2005
- ANSI B89.3.4, "Axes of Rotation: Methods for Specifying and Testing Standard", ANSI/ASME, 2004
- 오윤진, 박천홍, "초정밀 이송테이블의 5자유도 운동오차 측정", 한국 정밀공학회지, 22 (11), 135-141, 2005
- 김인동, 신동의, 한창수, "초정밀 리니어 스테이지의 운동오차 측정방법", 한국정밀공학회 2008 추계학술대회논문집, 9-10