

PSD 를 이용한 초정밀소형공작기계의 기하학적 오차 측정[§]

권설령* · 권성환* · 양승한*[†]

* 경북대학교 기계공학부

Measurement of Geometric Errors of an Ultra Precision mMT Using PSDs

Seol Ryung Kwon*, Sung Hwan Kweon* and Seung Han Yang*[†]

* School of Mechanical Engineering, Kyungpook Nat'l Univ.

(Received August 16, 2010 ; Revised November 1, 2010 ; Accepted November 10, 2010)

Key Words : Geometric Error(기하학 오차), PSD(포지션 센싱 디텍터), Error Measurement(오차 측정), mMT(소형공작기계)

초록: 초정밀 소형공작기계는 초정밀가공분야에서 마이크로/메조 스케일 가공품의 정밀제조기술의 핵심으로 개발되어 왔다. 소형초정밀기계의 기하학적 오차는 가공품의 품질에 큰 영향을 미치기 때문에 반드시 분석 및 보정되어야 한다. 기존 소형공작기계의 기하학적 오차는 주로 레이저 간섭계로 측정되었으나 한번의 설치로 모든 기하학적 오차를 측정할 수 없고 까다로운 절차를 따라야 한다. 그 대안으로써 PSD 로 구성된 측정시스템이 개발되었으나 측정가능거리가 PSD 의 유효영역에 한정되었다. 본 논문에서는 측정가능거리를 확장시키고 설치오차를 최소화하여 6-자유도 기하학적 오차를 측정하는 시스템을 제안하고 민감도 해석과 실험을 통하여 이 측정 시스템의 정확도를 증명하였다.

Abstract: Ultra-precision miniaturized machine tools essential for manufacturing accurate machine components in micro/meso-scale have been developed. To realize high accuracy using mMTs, geometric errors, which are considered as the main sources of inaccuracy should be identified and compensated. The conventional systems for measuring geometric errors, such as a laser interferometer, can measure only one geometric error in a single setup and they involve complicated measurement procedures. A measurement system using PSDs is a promising alternative but the measurable range of such systems is limited to the active range of the PSDs. The proposed measurement system using PSDs can overcome the limit of small measurable range. Further, the mounting errors that could occur during set-up process can be avoided. In this paper, an algorithm corresponding to the system was analyzed and experiments were carried out.

1. 서 론

초정밀 가공 시에 높은 정확도와 복잡한 모양의 가공을 실현하는 것이 중요해졌다.⁽¹⁾ 초정밀 제품을 가공하는 MEMS(Micro Electro Mechanical System) 기술은 반도체 공정에서 대부분 사용되며 일반적으로는 초정밀 mMT 가 마이크로/메조 범위의 정밀 부품들을 가공하기 위해 개발되어 왔다.

mMT 에서 정확도를 감소시키는 주요 요인 중 하나인 기하학적 오차는 대부분 정밀하지 못한 부품가공, 조립불량, 치짐 또는 마모에 의해 발생한다. 따라서 기하학 오차는 가공을 시작하기

전 측정되고 보정되어야 한다. 기존에는 레이저 간섭계, 전자 레벨기 등으로 기하학적 오차를 측정하였으나,^(2,3) 측정 시스템의 부피가 커서 mMT 에 설치하기 힘들고 한번의 설치로 6 개의 오차 측정이 불가능하여 많은 시간과 비용이 요구된다.⁽⁴⁾

최근에 레이저와 광학 센서 등을 이용한 측정 시스템이 대안으로 개발되어 왔다. Bae 는⁽⁵⁾ 광학 빔 치짐과 삼각측량을 이용하였으나 측정 가능 범위가 레이저 소스의 빔의 반경으로 한정되었다. Cuttino 는⁽⁶⁾ 세 개의 수직된 레이저 빔을 발산하는 레이저 모듈과 세 개의 PSD 로 구성된 측정 시스템을 제안하였으나 레이저 모듈의 제작과 조립 실현 가능성이 낮다는 한계가 있다. Lee⁽⁷⁾는 3 축 mMT 에서 정전용량 센서를 사용하여 축 당 5 개 오차와 직각도 오차를 측정하였다. Lee⁽⁸⁾는 세 개의 PSD 를 사용하여 단순하고 정확한 6-자유도

[†] Corresponding Author, syang@knu.ac.kr

기하학적 오차 측정시스템을 제안 하였으나 측정 시스템의 측정 범위는 스테이지에 비해 매우 작은 PSD 자체의 유효범위 내로 한정되었다.

본 논문에서는 측정 가능 범위 확장과 정확도 향상을 위한 6-자유도 기하학적 오차 측정 시스템을 제안한다. 측정 시스템은 두 개의 레이저 다이오드와 미러로 구성된 레이저 모듈과 세 개의 2-D PSD 와 빔 스플리터로 구성된 PSD 모듈의 두 부분으로 제작되어서 설치 과정이 용이하다. 측정 시스템의 오차 추정 알고리즘을 유도하고 고차항 제거와 설치 오차에 의한 측정 시스템의 정확도 감소 정도를 시뮬레이션을 통해 알아보고 측정 실험을 수행하였다.

2. 6-자유도 기하학적 오차측정 시스템

Fig. 1 과 같이 측정시스템은 레이저 모듈과 PSD 모듈로 구성된다. 두 개의 레이저 다이오드와 미러로 구성된 레이저 모듈은 고정되어 있으며 한 개의 빔 스플리터와 세 개의 PSD 로 구성된 PSD 모듈은 스테이지 위에 장착된다. 빔 소스 S₁ 는 빔 스플리터에 의해 두 개의 빔으로 분리되어 PSD2 와 PSD3 에 투사되고, 빔 소스 S₂ 는 미러에 의해 특정 각도 θ로 반사되어 PSD1 에 투사된다.

기존의 PSD 를 이용한 다자유도 측정 시스템의 오차측정은 PSD 의 유효범위에 한정되었는데 대부분의 스테이지 이동거리는 PSD 의 유효측정범위에 비해 훨씬 크기 때문에 스테이지의 총 이동거리에 대해 기하학적 오차를 측정하기에는 한계가 있다. 이를 극복하기 위하여 제안한 측정시스템에서는 미러의 반사각도 θ를 이용하여 측정가능범위를 확장시킨다. 6 개의 기하학적 오차를 계산하기 위하여 3 개의 2-D PSD 를 사용하여 6 개의 유효한 데이터를 얻는다.

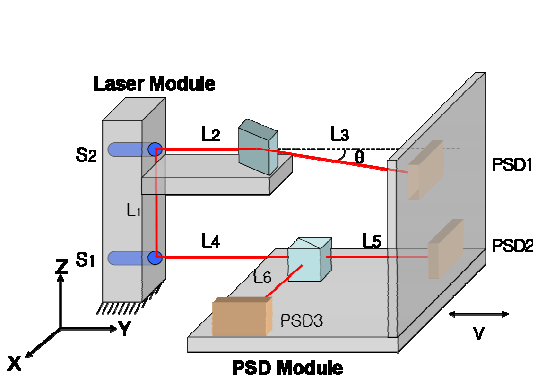


Fig. 1 Configuration of the measurement system for 6-DOF error

2.1 기하학적 오차와 PSD 출력값의 관계

일반적으로 모든 오차들은 스테이지 위에 장착된 PSD 모듈이 움직일 때 동시에 발생하며 PSD 의 출력값들은 모든 기하학적 오차 값들을 포함하고 있다. 출력값과 기하학적 오차의 수학적 관계를 알아내기 위하여 동차변환행렬을 이용하였다. 여기서, τ_R^{S₁} 는 {S₁} 좌표계를 기준좌표계 {R}으로 변환시키는 동차변환행렬을 의미한다.

$$\tau_R^{S_1} = \begin{bmatrix} 1 & -\epsilon_z & \epsilon_y & \delta_x \\ \epsilon_z & 1 & -\epsilon_x & y + \delta_y \\ -\epsilon_y & \epsilon_x & 1 & \delta_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

알고리즘 유도과정에서 레이저 모듈이 Y 축으로 움직인다.

2.1.1 PSD1 의 벡터 해석

Fig. 2 와 같이 기준좌표계 {R}을 레이저 소스 S₁ 의 초기위치에 설정한다. 점선은 스테이지가 움직이기 전의 레이저 빔의 경로이며 굵은 선은 스테이지가 Y 축으로 움직인 후 실제 레이저 빔의 경로이다. 여기서, ^RP_{Rorg}^a 는 {R} 좌표계의 원점에서 a 점까지의 위치 벡터를 {R} 좌표계에서 표현한 것이다.

{S₁} 좌표계는 기준좌표계 {R} 에서 Y 축 방향으로 y 만큼 이동한 후의 스테이지 위에 설정한 좌표계이며 {S₂} 좌표계는 레이저 다이오드 S₂에, {P} 좌표계는 미러에 설정한다. 레이저 빔은 미러에 의해 θ만큼 반사되어 PSD1 에 투사된다. 이때, 반사된 레이저 빔의 벡터 ^PP_{Porg}² 는 [sin θ cos θ 0]^T 로써 단위벡터 이다. 아래의 식에서, xi 와 yi, zi 는 i 번째 PSD 의 출력값을 나타내며 식 (2)-(7)은 벡터 해석을 위한 수식들이다.

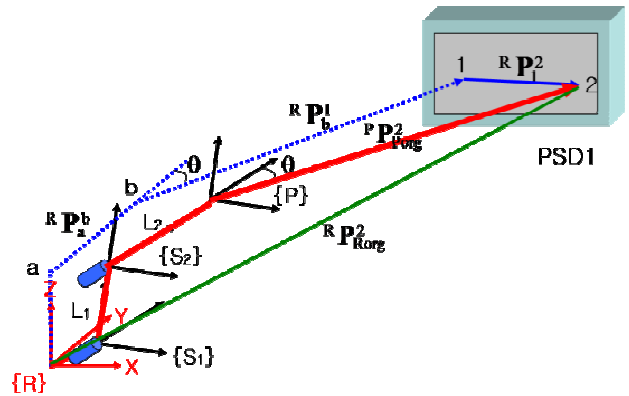


Fig. 2 Laser beam related to a mirror and PSD1

$${}^R P_{Rorg}^2 = {}^R P_{Rorg}^1 + {}^R P_1^2 \quad (2)$$

$${}^R P_{Rorg}^1 = {}^R P_{Rorg}^a + {}^R P_a^b + {}^R P_b^1 = \begin{bmatrix} L_3 \tan \theta \\ L_2 + L_3 \\ L_1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$${}^R P_1^2 = \begin{bmatrix} x1 \\ 0 \\ z1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\tau_{S1}^{S2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\tau_{S2}^P = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & L_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$${}^R P_{Porg}^2 = \tau_R^{S1} \tau_{S1}^{S2} \tau_{S2}^P \begin{bmatrix} P_{Porg}^2 \times \sin \theta \\ P_{Porg}^2 \times \cos \theta \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

식 (2)에서 i, j, k 성분의 세 식들을 얻을 수 있으며 연립하여 풀면 PSD1 의 출력값 x1 과 z1 의 값을 다음과 같이 6 개의 기하학적 오차로 표현된다.

$$x1 = \frac{\varepsilon_z \cos \theta (L_3 + \varepsilon_x L_1 - \delta_y - y) - \sin \theta (\delta_y + y - L_3 - \varepsilon_x L_1)}{\cos \theta + \varepsilon_z \sin \theta} + \delta_x - \varepsilon_z L_2 + \varepsilon_y L_1 - L_3 \tan \theta \quad (8)$$

$$z1 = \frac{\varepsilon_x \cos \theta (-\delta_y - y + L_3 + \varepsilon_x L_1)}{\cos \theta + \varepsilon_z \sin \theta} + \delta_z + \varepsilon_x L_2 + \frac{\varepsilon_y \sin \theta (\delta_y + y - L_3 - \varepsilon_x L_1)}{\cos \theta + \varepsilon_z \sin \theta} \quad (9)$$

2.1.2 PSD2 의 벡터 해석

Fig. 3 과 같이 스테이지 위에 존재하는 레이저 빔 S₁ 은 Y 축으로 움직이고, 빔 스플리터를 통과하여 PSD2 로 투사된다. 이 때, 레이저 빔의 단위 벡터는 ${}^{S1} u_{S1org}^2 = [0 \ 1 \ 0]^T$ 이다.

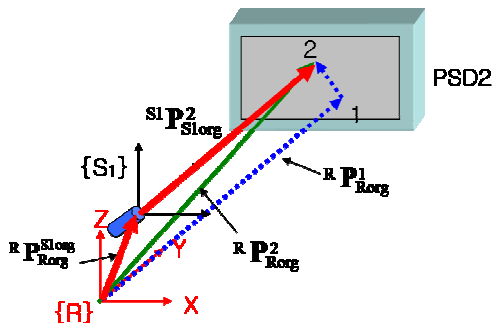


Fig. 3 Laser beam related to PSD2

$${}^R P_{Rorg}^2 = {}^R P_{Rorg}^1 + {}^R P_1^2 = \begin{bmatrix} 0 \\ L_4 + L_5 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x2 \\ 0 \\ z2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$${}^{S1} P_{S1org}^2 = |{}^{S1} P_{S1org}^2| \times {}^{S1} u_{S1org}^2 \quad (11)$$

$${}^R P_{Rorg}^2 = \tau_R^{S1} \cdot {}^{S1} P_{S1org}^2 \quad (12)$$

위의 식들을 연립하여 풀면 PSD2 의 출력값과 기하학적 오차의 관계를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$x2 = \delta_x - \varepsilon_z (-\delta_y - y + L_4 + L_5) \quad (13)$$

$$z2 = \delta_z + \varepsilon_x (-\delta_y - y + L_4 + L_5) \quad (14)$$

2.1.3 PSD3 의 벡터 해석

S₁ 에서 나오는 레이저 빔은 빔 스플리터에 의해 반사되어 PSD3 에 투사된다. 빔 스플리터는 45° 의 대각면에 대하여 빛을 반사시키므로 PSD3 의 출력값 y3 와 z3 는 식 (13)과 (14)에서 L₅ 를 L₆ 으로, x2 를 y3 으로, z2 를 z3 으로 교체하면 얻을 수 있다.

$$y3 = \delta_x - \varepsilon_z (-\delta_y - y + L_4 + L_6) \quad (15)$$

$$z3 = \delta_z + \varepsilon_x (-\delta_y - y + L_4 + L_6) \quad (16)$$

2.2 6-자유도 기하학적 오차 추정 알고리즘

식 (8), (9)와 (13)-(16)은 세 개의 PSD 의 출력값과 6 개의 기하학적 오차의 관계를 나타내며 고차항들을 포함한다. 오차 추정 알고리즘에서 기하학적 오차의 곱으로 나타나는 고차항들은 무시한다. 따라서, 다음과 같이 6 개의 기하학적 오차들을 추정하는 알고리즘을 얻을 수 있다.

$$x1 = \frac{-\varepsilon_z \sec \theta L_3 - \sin \theta (\delta_y + y - \varepsilon_x L_1)}{\cos \theta + \varepsilon_z \sin \theta} + \frac{\cos \theta (\delta_x + \varepsilon_z y - \varepsilon_z L_2 + \varepsilon_y L_1)}{\cos \theta + \varepsilon_z \sin \theta} \quad (17)$$

$$z1 = \frac{\varepsilon_y \sin \theta (y - L_3) + \cos \theta (\delta_z - \varepsilon_x y + \varepsilon_x (L_2 + L_3))}{\cos \theta + \varepsilon_z \sin \theta} \quad (18)$$

$$x2 = \delta_x + \varepsilon_z (y - L_4 - L_5) \quad (19)$$

$$z2 = \delta_z - \varepsilon_z (y - L_4 - L_5) \quad (20)$$

$$y3 = \delta_x + \varepsilon_z (y - L_4 - L_6) \quad (21)$$

$$z3 = \delta_z - \varepsilon_x (y - L_4 - L_6) \quad (22)$$

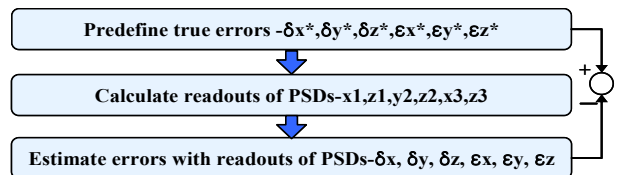


Fig. 4 Flowchart of simulation for adequacy of the algorithm (due to elimination of high order errors)

고차의 오차항 제거가 오차 추정 알고리즘의 정확도에 미치는 영향을 시뮬레이션을 통해 알아보았으며 Fig. 4는 시뮬레이션의 순서를 나타낸다. 먼저, 실제 기하학적 위치 오차의 범위는 $\{-100\mu\text{m}, 100\mu\text{m}\}$, 각 오차의 범위는 $\{-200\text{arcsec}, 200\text{arcsec}\}$ 에서 무작위 값을 선택하여 실제 기하학적 오차로 정의하고 식 (8), (9)와 (13)-(16)를 이용하여 각 PSD의 출력값을 계산한다. PSD의 출력값과 오차 추정 알고리즘을 이용하여 6개의 기하학적 오차를 추정하여 실제 오차와 추정된 기하학적 오차의 차이를 비교하였다. 이 시뮬레이션은 100번 수행하여 오차 차이의 평균값을 구하였다.

시뮬레이션의 결과, 미리 정의된 실제 기하학적 오차와 알고리즘에 의해 추정된 기하학적 오차의 차이가 위치 오차는 $\pm 1\text{nm}$, 각 오차는 $\pm 3 \times 10^{-10}\text{arcsec}$ 이하이다. 따라서, 고차의 오차항 제거는 알고리즘의 정확도에는 영향을 거의 주지 않는다.

2.3 설치 오차에 의한 오차 추정 알고리즘의 민감도 해석

각 광학 기기들을 설치하고 조립할 때 레이저 빔의 이상적인 경로와 실제 경로의 불일치로 설치 오차가 발생하는데 이는 오차 추정 알고리즘의 정확도를 저하시킨다. 설치 오차를 최소화 하기 위하여 측정 시스템의 모든 요소들을 레이저 모듈, PSD 모듈 두 부분으로 제작하여 설치 오차를 기계오차 수준으로 감소시키고 설치 과정을 간소화 하였다. 설치 오차에 의한 오차 추정 알고리즘의 민감도를 분석하기 위하여 시뮬레이션을 수행하였다. 각 광학 기기들의 이상적인 좌표계와 설치 오차에 의해 변경된 좌표계는 동차변환행렬로 표현 가능하며 2.2 절의 시뮬레이션과 유사한 방법으로 진행하였다.

$$\tau_R^{S1} = \tau_R^{S1*} \tau_{S1*}^{S1}$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & -\epsilon_{mz} & \epsilon_{my} & \delta_{mx} \\ \epsilon_{mz} & 1 & -\epsilon_{mx} & \delta_{my} \\ -\epsilon_{my} & \epsilon_{mx} & 1 & \delta_{mz} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -\epsilon_z & \epsilon_y & \delta_x \\ \epsilon_z & 1 & -\epsilon_x & y + \delta_y \\ -\epsilon_y & \epsilon_x & 1 & \delta_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (23)$$

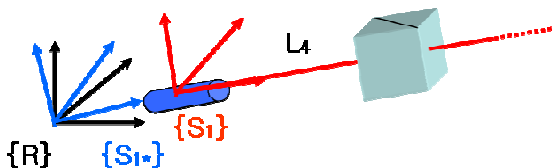


Fig. 5 Coordinate frame of $\{S_1\}$ due to mounting errors

각 좌표계에 (23)과 유사한 동차변환행렬을 곱하여 세 개의 PSD의 출력값과 기하학적 오차, 설치 오차와의 관계를 구할 수 있다. 무작위 값의 설치 오차와 기하학적 오차에 의한 PSD의 각각의 출력값을 구한 후 오차 추정 알고리즘을 이용하여 기하학적 오차를 추정하였다.

실제 기하학적 오차의 범위는 위치 오차 $\{-20\mu\text{m}, 20\mu\text{m}\}$ 와 각 오차 $\{-20\text{arcsec}, 20\text{arcsec}\}$ 이며, 설치 오차는 위치 오차 $\{-100\mu\text{m}, 100\mu\text{m}\}$ 와 각 오차 $\{-200\text{arcsec}, 200\text{arcsec}\}$ 범위에서 무작위 값으로 결정하였다. 모든 시뮬레이션은 100번 실행하였으며, Table 1의 시뮬레이션 결과는 설치 오차가 추정 알고리즘에 미치는 영향이 작음을 보여준다.

3. 실험

3.1 측정 시스템의 실험 준비

기하학적 오차를 측정하기 위하여 Fig. 6 및 Fig. 7과 같이 측정 시스템을 설치 하였다.

Table 1 Sensitivity analysis of mounting errors

Error	Maximum difference between true and estimated error
Displacement	0.12 μm
Horizontal Straightness	0.0117 μm
Vertical Straightness	0.0126 μm
Roll	2×10^{-5} arcsec
Pitch	2.3×10^{-5} arcsec
Yaw	0.8×10^{-5} arcsec

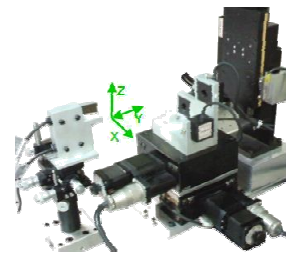


Fig. 6 The measurement system

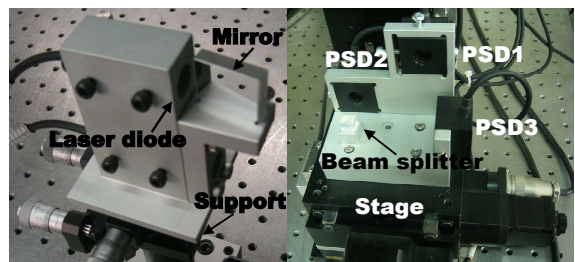


Fig. 7 Detail photos of the Laser and the PSD module

Table 2 Specifications of components and parameters

	Specification
Laser diode	Power: 5mW Wave Length: 655nm Beam Diameter: 0.15mm
PSD	Active Area: 4 x 4mm (90% of resistance length) Resolution: 100nm
Beam Splitter	Angle Tolerance: 3arcmin Dimension: 10 x 10 x 10mm Separation Ratio: 50/50
Mirror	Surface Flatness: $\lambda/10$ Dimension: 1.5 x 1.5mm
Parameters	L1=15mm, L2=158.08mm, L3=41.8mm L4=141.9mm, L5=36.18mm, L6=74.88mm Mirror angle, $\theta=18^\circ$

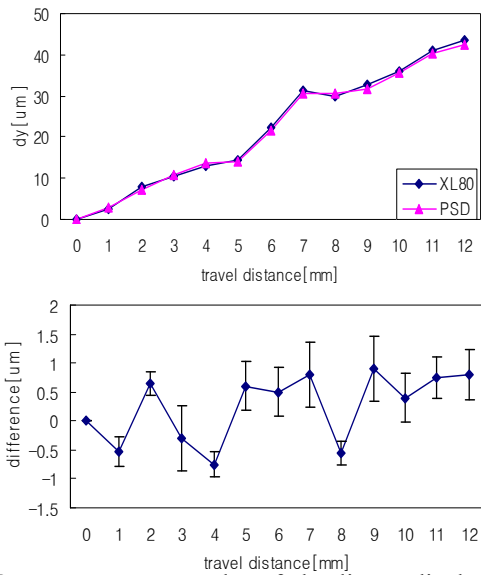


Fig. 8 Measurement results of the linear displacement error and difference between the system and XL80

Table 2 는 실험에서 사용된 기기들의 치수, 성능 및 시스템에 적용된 수치 값이다. 실험에서 미러의 각도는 시스템의 측정 가능 범위를 세배로 확장시키기 위하여 18°로 레이저 빔을 반사하도록 제작하였다.

3.2 실험 결과

측정 시스템을 mMT 에 설치하여 Y 축의 6 개의 기하학적 오차 - 선형변위, 수직진직도, 수평진직도, 롤, 피치, 요 - 를 측정하였다. 미러의 각도로 인하여 PSD1 의 해상도는 약 300nm 로 감소하며 측정 가능 범위는 12mm 로 증가한다. 레이저 간섭계 (Renishaw XL80)를 이용하여 기하학적 오차를

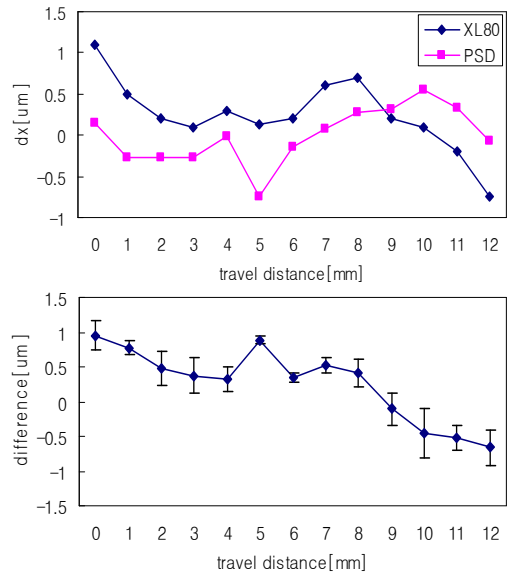


Fig. 9 Measurement results of the horizontal straightness error and difference between the system and XL80

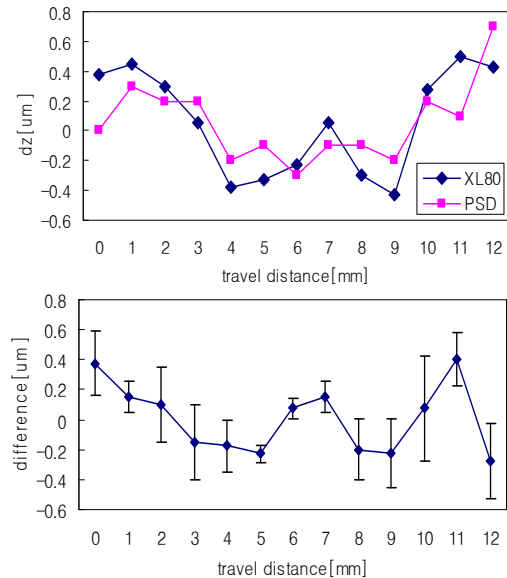


Fig. 10 Measurement results of the vertical straightness error and difference between the system and XL80

측정한 후 결과를 비교하였고 기하학적 오차는 1mm 의 간격으로 5 번 측정하여 평균값과 편차를 그래프로 나타내었다.

위와 같이 위치 오차에서 PSD 를 이용한 측정 시스템의 정확도는 $\pm 1\mu\text{m}$ 이하이다.

레이저 간섭계는 롤 오차 측정이 불가능하므로 Fig. 11 에서는 PSD 를 이용한 측정 시스템의 측정 결과만을 나타내었다.

피치와 요 오차를 측정 결과, 측정 시스템은 각 오차에서 $\pm 3\text{arcsec}$ 의 정확도를 가진다.

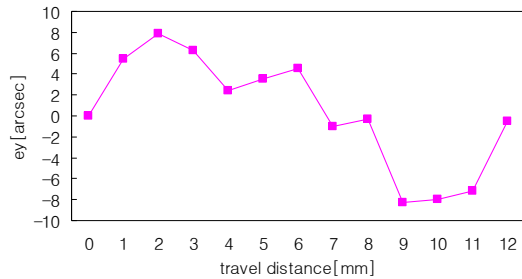


Fig. 11 The result of the roll error

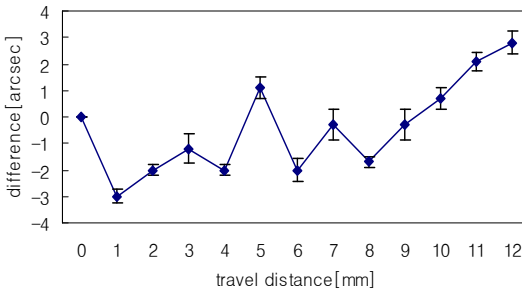
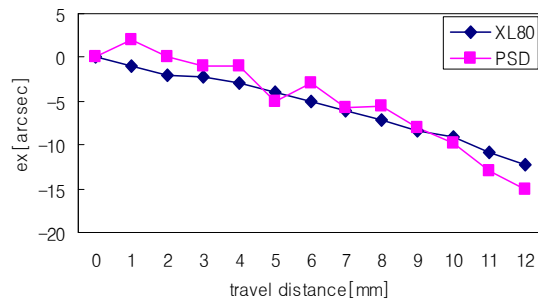


Fig. 12 Measurements result of the pitch error and difference between the system and XL80

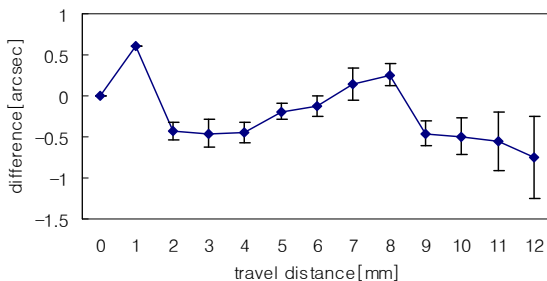
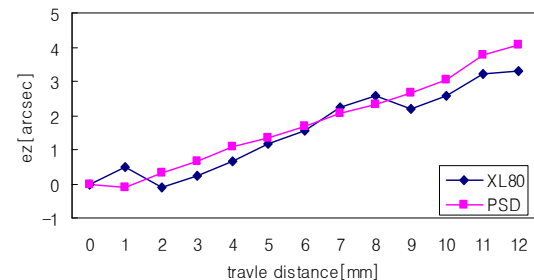


Fig. 13 Measurement results of the yaw error and difference between the system and XL80

4. 결론

PSD 를 이용한 측정 시스템은 가공 오차범위 내에

서 6-자유도 기하학적 오차를 추정할 수 있다. 뿐만 아니라 두 부분으로 제작하여 설치 오차를 최소화 하였으며 설치 과정도 간소화하였다. PSD 유효 범위로 한정된 측정 가능 범위를 확장시켰다. 레이저 간섭계의 측정값과 비교한 결과, 제안한 측정 시스템은 위치 오차에서 $\pm 1\mu\text{m}$, 각 오차에서 $\pm 3\text{arcsec}$ 의 정확도를 가진다.

후 기

이 논문은 2010 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 도약연구(No.2010-001889)와 한국연구재단의 대학중점연구소 지원사업으로 수행된 연구임(2010-0020089).

참고문헌

- (1) Fujimasa, I., 1993, "Perspective of Micromachine Research," *The Journal of the Institute of Electronics, Information, and Communication Engineers*, Vol. 76, No. 9, p. 976.
- (2) Takaya, Y., Shimizu, H., Takahashi, S. and Miyoshi, T., 1999, "Fundamental Study on the New Probe Technique for the Nano-CMM Based on the Laser Trapping and Mirau Interferometer," *Journal of the International Measurement Confederation*, Vol.25, No.1, pp. 9~18.
- (3) Yang, H., Pan, C.T. and M.C. Chou, 2001, "Ultra-Fine Machining Tool/Molds by LIGA Technology," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 11, No. 2, pp. 94~99.
- (4) Hewlett Packard, HP 5529A Dynamic Calibrator: Verify Machine Performance with the World Standard for Laser-Based Metrology.
- (5) Bae, E.W., Kim, J.A. and Kim, S.H., 2001, "Multi-Degree-of-Freedom Displacement Measurement System for Milli-Structures," *Measurement Science & Technology*, Vol. 12, No. 9, pp. 1495~1502.
- (6) Prather, M. J., Cuttino, J. F. and Schinstock, D. E., 1996, "Three-Dimensional Metrology Frame for Precision Applications," *American Society for Precision Engineering*, pp. 668~671.
- (7) Lee, J.H. and Yang, S.H., 2005, "Measurement of Geometric Errors in a Miniaturized Machine Tool Using Capacitance Sensors," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 164/165, pp. 1402~1409.
- (8) Lee, S. W., Mayor, R. and Ni, J., 2005, "Development of a Six-Degree-of-Freedom Geometric Error Measurement System for a Meso-Scale Machine Tool," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 127, No. 4, pp. 857~865.