

오차보정을 위한 초정밀 테이블의 5 자유도 운동오차 측정

오윤진*, 박천홍(한국기계연구원 공작기계그룹), 이득우(부산대학교 나노과학기술학부)

Measurement of 5 DOF Motion Errors in the Ultra Precision Feed Tables for Error Compensation

Y. J. Oh, C. H. Park (KIMM), D. W. Lee (Pusan National Univ.)

ABSTRACT

In this paper, measuring system of 5 DOF motion errors are proposed using two capacitive type sensor, a straight edge and a laser interferometer. Yawing error and pitching error are measured using the laser interferometer, and rolling error is measured by the reversal method using a capacitive type sensor. Linear motion errors of horizontal and vertical direction are measured using the sequential two point method. In this case, influence of angular motion errors is compensated using the previously measured angular motion errors. In the horizontal direction, measuring accuracy is within $0.05 \mu\text{m}$ and 0.27 arcsec , and in the vertical direction, it is within $0.15 \mu\text{m}$ and 0.5 arcsec . From these results, it is confirmed that the proposed measuring system is very effective to the measurement of 5 DOF motion errors in the ultra precision feed tables.

Key Words : SDOF motion error(5 자유도 운동오차), Reversal method(반전법), Sequential two point method(축차이점법), Capacitive type sensor(정전용량형 센서), Straight edge(참조면), Hydrostatic table(유정압테이블)

1. 서론

초정밀 가공기에 있어 이송테이블의 각 축방향 운동오차는 가공품의 형상정밀도에 지배적인 영향을 미치므로, 그에 상응하는 높은 정밀도가 요구되며, 이에 따라, 가공기 제작에 있어 각 이송축의 오차측정 및 수정의 반복을 통한 오차 보정은 불가피한 공정이 되고 있다.

현재, 이송테이블의 운동오차 측정에는 레이저 간섭계나 오토콜리메타가 일반적으로 이용되고 있으나, 서브미크론 이하의 운동오차가 측정 대상이 되면, 각각의 알고리즘상의 문제점이 측정한계로 작용한다. 레이저 간섭계의 경우, 각운동오차의 측정은 가능하나, 직선운동오차의 경우에는 노이즈가 수십배이상 증폭되는 정밀도 한계가 있다¹. 오토콜리메타의 경우에는 각운동오차의 측정에 주로 사용되며, 연산에 의해 직선운동오차의 측정도 가능하나, 반사경 평면도예의 의존성 및 측정거리에 의한 정도저하나 저응답속도등의 문제점이 있다. 또한, 두 측정장치 모두 플링오차의 측정이 불가능하다는

단점이 있다.

직선운동오차를 보다 정밀하게 측정할 수 있는 방법으로는 복수 개의 프루브를 이용하는 2 점법² 및 3 점법³ 등의 연구가 꾸준히 진행되어 오고 있으나, 2 점법의 경우에는 각운동오차의 간섭, 3 점법의 경우에는 센서간의 영점조정 등에 문제점이 있으며 전체적으로 센서간격에 따라 측정가능한 공간 주파수에 제약이 있다는 단점이 있다.

본 연구에서는, 이상에서의 장, 단점을 고려하고, 서브미크론대의 운동오차 보정을 위해 반복적인 측정이 수행되는 경우에도 적용 가능하도록, 고분해능을 갖는 2 개의 용량형 센서와 참조면(스트레이트 에지) 및 레이저간섭계를 이용한 초정밀 5 자유도 운동오차 측정시스템을 구축하고자 하였다. 이를 위해, 먼저, 각운동오차 가운데 요잉 및 피칭오차는 레이저간섭계를 이용하여 측정하며, 플링오차의 경우에는 용량형센서와 참조면을 이용한 반전법(Reversal Method, 이하 RVM)을 적용하여 측정하였다. 직선운동오차의 측정에는 축차 2 점법(Sequential Two Point Method, 이하 STPM)을 적용하였으며, 이

때 측정오차로 작용하는 각운동오차의 영향은 레이저간섭계에 의한 각운동오차 측정값을 이용하여 보정하였다. 한편, 수직방향의 경우에는 플링오차도 영향을 미치므로 피칭오차와 함께 보정하였다. 또한, 수평방향에 있어서, 측차 2 점법에 의한 참조면의 프로파일을, 반전법을 이용하여 측정된 참조면의 프로파일과 비교하고, 참조면 프로파일을 이용하여 역으로 계산한 각운동오차를 레이저간섭계에 의한 각운동오차와 비교함으로써 측정방법의 타당성을 검증하였다.

2. 운동오차의 측정방법

2.1 측차 2 점법

측차 2 점법을 이용한 수평방향 오차 측정에 있어서 변수 및 오차방향의 정의를 Fig. 1 에 나타내었다. 테이블에 평행하게 설치된 센서 A, B 를 센서 간격 l_x 만큼 이동시키는 경우, i 번째 및 $i+1$ 번째 측정에서의 각 센서의 측정값 R_A, R_B 는 식 (1) 과 같이 나타낼 수 있으며, 이로부터 직선운동오차 $e(x)$ 및 참조면 오차 $r(x)$ 를 식 (2) 와 같이 구할 수 있다. 단, 여기서 θ_x 는 요잉오차이며, 레이저간섭계를 이용하여 측정된 값을 적용한다.

$$\begin{aligned} R_{A,i}(x) &= r_i(x) + e_i(x) \\ R_{B,i}(x) &= r_{i+1}(x) + e_i(x) - l_x \theta_{y,i}(x) \\ R_{A,i+1}(x) &= r_{i+1}(x) + e_{i+1}(x) \\ R_{B,i+1}(x) &= r_{i+2}(x) + e_{i+1}(x) - l_x \theta_{y,i+1}(x) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} r_{i+1}(x) &= r_i(x) + R_{B,i}(x) - R_{A,i}(x) + l_x \theta_{y,i}(x) \\ e_{i+1}(x) &= e_i(x) + R_{A,i+1}(x) - R_{B,i}(x) - l_x \theta_{y,i+1}(x) \\ r_0(x) &= e_0(x) = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

한편, 연속 측정으로부터 센서간격 l_x 당 m 개의 데이터를 얻는 경우에는 $j=1, \dots, m$ 개의 데이터군에 대해 식 (2) 를 적용하여 직선운동오차 및 참조면 오차를 구한 후, $j=2, \dots, m$ 의 데이터가 각각 $j=1$ 의 오차 프로파일과 오차가 최소가 되도록 하는 초기

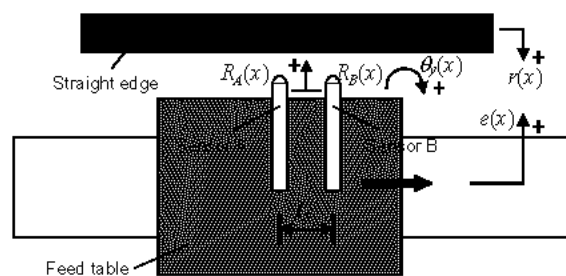


Fig. 1 Notations in the sequential two point method (horizontal direction)

값을 구함으로써 연속적인 프로파일을 구할 수 있다.⁴

수직방향 측정의 경우에는 Fig. 2 와 같이 정의하였으며, 이 경우 직선운동오차 및 참조면오차는 식 (3) 과 같이 구할 수 있다. 단, θ_y, θ_x 는 각각 피칭오차 및 플링오차이며 l_y 는 테이블 중심에서 측정점까지의 센서거리를 나타낸다.

$$\begin{aligned} r_{i+1}(x) &= r_i(x) + R_{B,i}(x) - R_{A,i}(x) + l_x \theta_{p,i}(x) \\ e_{i+1}(x) &= e_i(x) + R_{A,i+1}(x) - R_{B,i}(x) - l_x \theta_{p,i+1}(x) + \phi_i \\ \phi_i &= l_y \theta_{r,i}(x) - l_y \theta_{r,i+1}(x) \\ r_0(x) &= e_0(x) = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

2.2 반전법

반전법의 측정 원리를 수평방향 측정을 기준으로 Fig. 3 에 나타내었으며 그에 따른 직선운동오차 및 참조면의 오차 계산식은 식 (4) 와 같다. 한편, 반전법을 수직방향에 대해 적용하는 경우에는 참조면의 오차와 직선운동오차를 분리하여 계산하는 것은 불가능하나 플링오차는 식 (5) 와 같이 구할 수 있다.

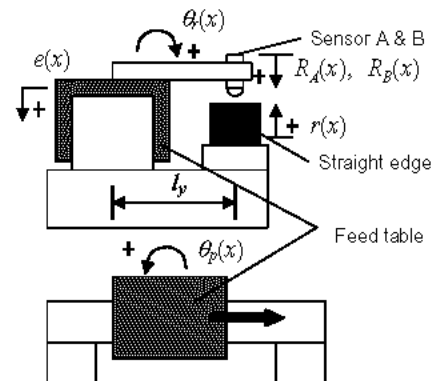


Fig. 2 Notations in the sequential two point method (vertical direction)

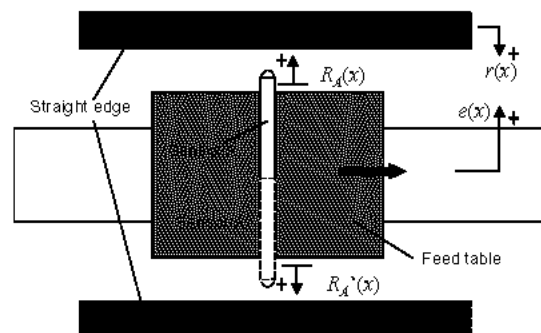


Fig. 3 Measuring principle of the reversal method

$$r(x) = \frac{R_A(x) + R'_A(x)}{2}, \quad e(x) = \frac{R_A(x) - R'_A(x)}{2} \quad (4)$$

$$r(x) + e(x) = \frac{R_A(x) + R'_A(x)}{2} \quad (5)$$

$$\theta_r(x) = \frac{1}{l_y} \frac{R_A(x) - R'_A(x)}{2}$$

3. 실험장치 및 예비실험

3.1 실험장치의 구성

Fig. 4 에 실험에 사용된 유정압테이블과 측정장치를 나타내었다. 유정압테이블은 수직, 수평 모두 양면지지형으로 되어있으며, 길이 방향으로 3 개의 패드가 대향되어 배치되어 있다. 테이블은 무철심형 리니어모터(LEA-S-4, Anorad)와 제어기(MEI)를 이용하여 PC 로 구동되며, 레이저스케일(BS75A, 분해능 10 nm, Sony)은 레일 측면에 설치되어 있다.

유정압안내면에 공급되는 윤활유는 윤활탱크와 연결되어 있는 냉각장치(AKZ206, Daikin)를 이용하여 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 의 온도로 제어된다.

축차 2 점법 및 반전법에 있어서는 정전용량형 센서(ADE3401, 1nm 분해능)를 사용하였으며 참조면(평탄도 64 nm / 340 mm, Nikon)은 Zerodur 재질에 피측정면에는 Al 코팅이 되어 있다. 또한, 센서 고정용 치구는 탄성변형 및 열변형에 따른 오차를 가능한 한 감소시키기 위해 세라믹재질을 이용하여 제작하였다. 용량형 센서의 설치간격 $l_x=17$ mm 이며, 테이블중심으로부터 참조면까지의 센서거리 $l_y=210$ mm 로 설정하였다. 축차 2 점법의 적용을 위해 초기치로 사용되는 각운동오차의 측정에는 레이저간섭계(HP5529A)를 사용하였으며 모든 측정치는 250 mm 이송 구간에 대해 5 회 반복 측정하고 반복오차(4 σ)를 같이 나타내었다. 실험은 $20 \pm 0.6^\circ\text{C}$, 상대습도 50 \pm 3%로 유지되는 항온항습실에서 수행하였다.

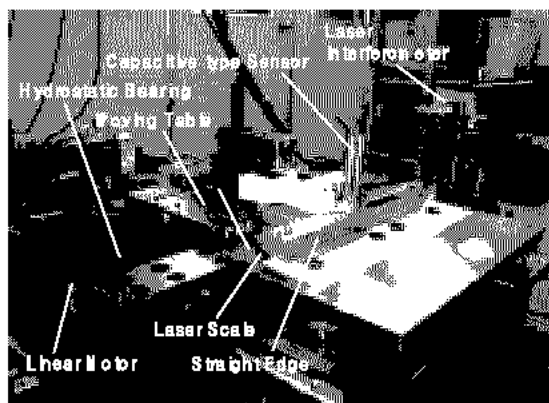


Fig. 4 Experimental setup

3.2 환경오차의 영향

먼저, 대기온도, 유정압용 윤활유 등의 온도변화 및 그 변화가 측정에 미치는 영향을 파악하기 위해 실험장치 주요부의 온도변화를 열전대를 이용하여 2 시간동안 측정된 결과를 Fig. 5 에 나타내었다.

$\pm 0.6^\circ\text{C}$ 의 대기온도변화에 대해 테이블 및 센서 치구의 온도변화는 $\pm 0.15^\circ\text{C}$ 이내를 나타내고 있으며, 공급유온 보다는 대기온도의 변화주기에 주로 영향을 받고 있음을 보이고 있다.

대기온도변화에 따른 정전용량형센서 자체의 측정 편차는 $0.01 \mu\text{m}$ 로 무시할 수 있으나, 센서치구의 온도변화($\pm 0.15^\circ\text{C}$)에 따른 측정값의 편차는 약 $0.2\mu\text{m}$ 가 되므로 반복오차가 정밀도와 같은 수준이 될 가능성이 있다. 이러한 측정환경의 영향을 고려하여, 이후 실험에 있어서는 항온실의 온도주기(약 12 분)를 참고하여 한 주기마다 1 회의 측정을 수행함으로써 환경에 의한 측정오차를 최소화하였다.

3.2 정전 용량형 센서의 개인특성

축차 2 점법의 적용시에 사용되는 2 개의 정전용량형 센서 간의 개인차를 확인하기위해, 두 센서를 테이블 앞쪽에 설치하고 참조면을 측정대상면으로 배치한 후, $0.5 \mu\text{m}/\text{step}$ 및 $1 \mu\text{m}/\text{step}$ 으로 테이블(위

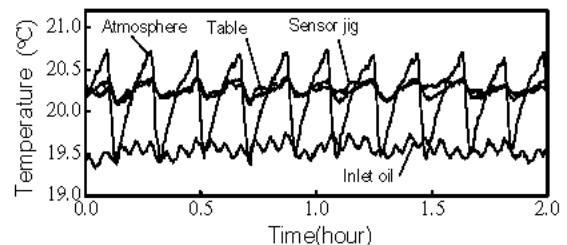


Fig. 5 Temperature variation of main parts

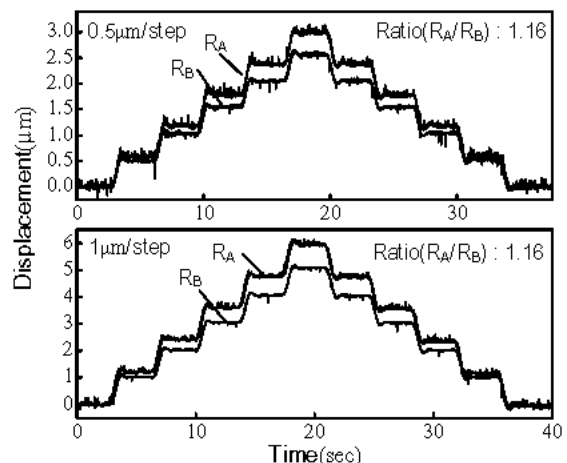


Fig. 6 Gain of capacitive type sensor A and B

치결정오차 $0.2 \mu\text{m} / 250 \text{mm}$)을 미소이송시켰을 때의 응답변위를 Fig. 6 에 나타내었으며, 두 센서의 위치를 교환하여 동일하게 측정된 결과도 같이 중복하여 나타내었다.

센서 B 의 경우, 위치에 관계없이, 지령값과 잘 일치하고 있으나, 센서 A 의 경우에는 지령값보다 큰 변위값을 나타내었으며, 이 측정결과로부터 두 센서간의 계인의 비는 1.16 으로 계산되었다. 따라서 이후 실험에 있어 센서 A 의 측정값은 이 계인 값을 이용하여 보정하였다.

4.5 자유도 운동오차의 측정결과

4.1 수평방향 운동오차의 측정

Fig. 1 과 같은 방법으로 축차 2 점법을 적용하기 위해 먼저 각운동오차를 레이저간섭계를 이용하여 Fig. 7 과 같이 측정하였으며, 이 각운동오차를 보정한 후의 축차 2 점법에 의한 직선운동오차 및 참조면 오차의 측정결과를 Fig. 8 에 나타내었다. 직선운동오차는 $0.26 \mu\text{m}$ 를 나타내었으며, 5 회 측정값으로부터의 반복오차는 $0.05 \mu\text{m}$ 를 나타내었다. 한편, 참조면의 오차는 $0.03 \mu\text{m}$ 로 측정되었으며 반복오차는 $0.02 \mu\text{m}$ 를 나타내었다.

이 측정결과와 타당성을 검증하기위해 반전법을 이용하여 측정된 직선운동오차와 참조면의 오차를 Fig. 9 에 나타내었다. 직선운동오차와 반복오차

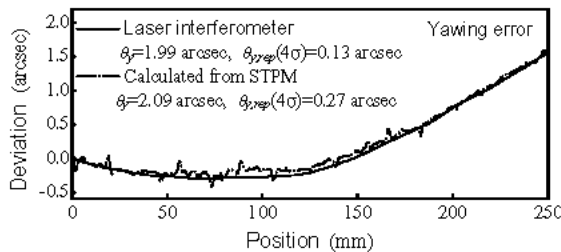


Fig. 7 Measured yawing error

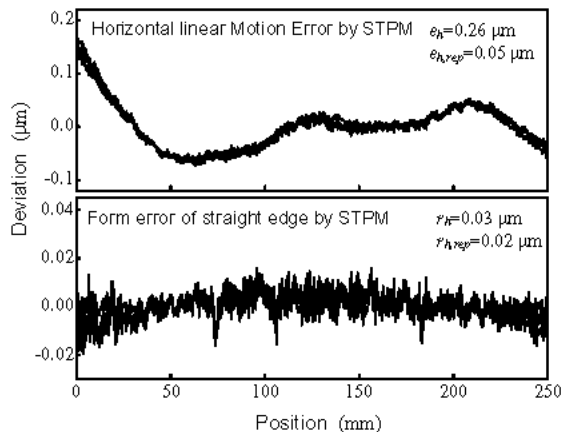


Fig. 8 Horizontal linear motion error and form error of straight edge measured using the STPM

는 각각 $0.24 \mu\text{m}$, $0.03 \mu\text{m}$ 로 반복오차 이내에서 두 측정값은 잘 일치하고 있으며 파형의 형태도 잘 일치함을 보이고 있다. 참조면의 오차에 있어서도 파형은 잘 일치하고 있으며 오차값도 $0.05 \mu\text{m}$ 로 반복오차의 범위내에서 축차 2 점법에 의한 결과와 잘 일치하고 있다. 이 반전법에 의한 참조면 오차 및 두 센서에 의한 측정값을 식 (6)의 관계에 적용하면 각운동오차(요잉오차)를 구할 수 있으므로 이 값을 구하여 Fig. 7 의 레이저간섭계에 의한 측정결과와 같이 나타내었다. 두 값은 파형이나 정량적인 값에 있어 반복오차 범위내에서 잘 일치하고 있음을 보이고 있다.

이상의 결과로부터 각운동오차 측정값과 축차 2 점법을 이용한 직선운동오차 측정 방법이 최대반복오차인 $0.05 \mu\text{m}$ 의 측정정밀도 범위에서 유효함을 확인하였다.

4.2 롤링오차의 측정

Fig. 3 및 식 (5)의 반전법을 이용하여 롤링오차를 측정하여 Fig. 9 에 나타내었다. 롤링오차 및 반복오차는 각각 0.5 arcsec 및 0.08 arcsec 를 나타내었다.

4.3 수직방향 운동오차의 측정

수직방향 운동오차의 경우에는 반전법의 적용

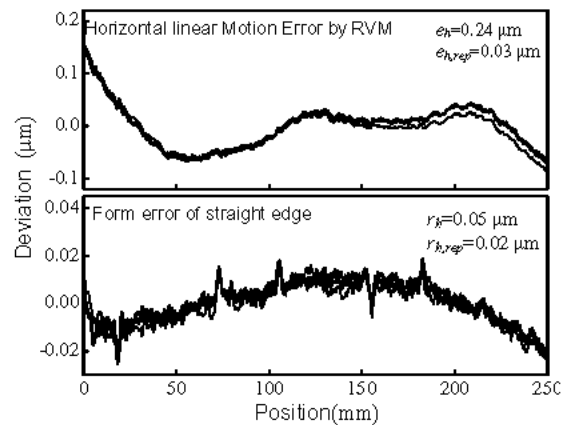


Fig. 9 Linear motion error and form error of straight edge measured using the RVM

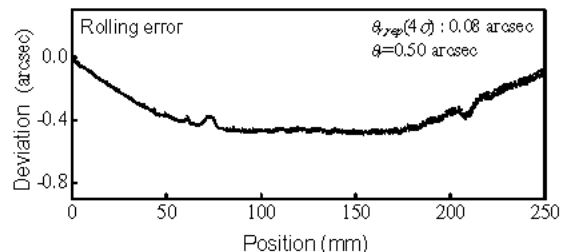


Fig. 10 Rolling error measured by the RVM

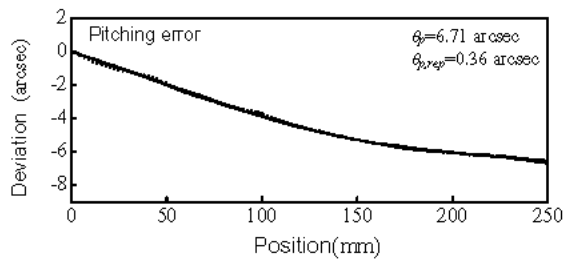


Fig. 11 Measured pitching error

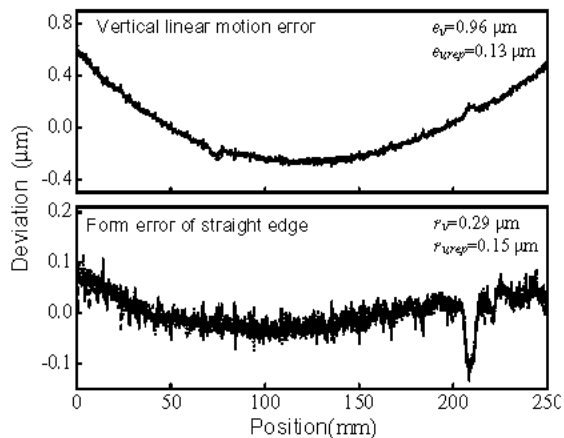


Fig. 12 Vertical linear motion error and form error of straight edge measured using the STPM

이 불가능하므로, 수평방향 운동오차의 검증결과를 토대로 측차 2 점법을 이용하여 직선운동오차 및 참조면 오차를 측정하였으며, 이를 위해 먼저 레이저간섭계를 이용하여 측정한 피칭오차를 Fig. 11 에, 직선운동오차 및 참조면 오차의 측정결과를 Fig. 12 에 각각 나타내었다. 피칭오차 및 반복오차는 6.71 arcsec 0.36 arcsec 를 나타내었으며, 수직방향의 직선운동오차 및 반복오차는 0.96 μm 및 0.13 μm 를 나타내었다. 또한, 참조면의 오차 및 반복오차는 각각 0.29 μm 및 0.15 μm 를 나타내었다. 참조면의 오차가 수평방향보다 크게 나타나는 것은 참조면의 수직방향 치짐에 따른 영향이며, 전체적으로 반복오차가 수평방향에 비해 크게 나타나는 것은 참조면을 지지하는 치구의 높이가 높아 대기온도의 변화에 따른 열변형의 영향이 크게 나타나기 때문으로 추정된다.

한편, 반전법을 이용하여 플링오차를 측정하는 경우로부터, 수직방향 직선운동오차와 참조면 형상오차가 합해진 파형을 얻을 수 있다. 이 파형으로부터 측차 2 점법에 의해 측정된 직선운동오차를 빼면 참조면의 형상오차만을 구할 수 있으며, 이 파형과 측차 2 점법에 의해 구해진 참조면 형상오차를 비교함으로써 수직방향 운동오차에 대한 측차 2 점법 적용의 타당성을 간접적으로 검증하였다. Fig. 12 는 측정결과를 나타낸 것으로 양 파형은 잘 일

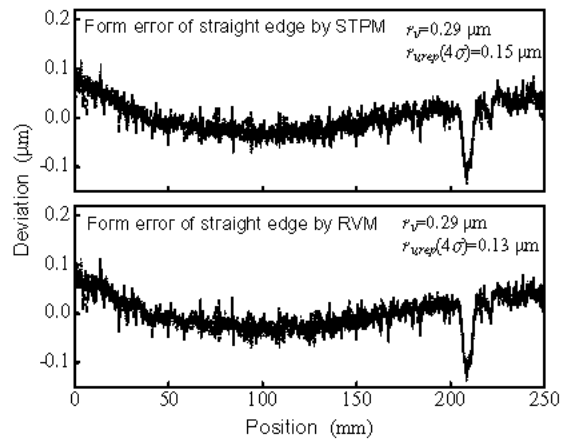


Fig. 12 Comparison of measured form error of straight edge

치하고 있어 측차 2 점법의 유용성을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는, 초정밀 테이블의 5 자유도 운동오차를 측정하기 위한 방법으로, 각운동오차(요잉 및 피칭)의 측정에는 레이저간섭계를 이용하고, 플링오차는 반전법을 적용하며, 직선운동오차는 각운동오차의 영향을 보정한 측차 2 점법을 이용하는 측정시스템을 구축하였다. 이 방법에 의한 측정결과와 검토로부터 각운동오차의 영향을 보정한 측차 2 점법의 경우, 수평방향에 대해서는 0.05 μm 및 0.27 arcsec 이내의 측정정밀도로 운동오차의 측정이 가능함을 확인하였으며, 수직방향의 경우에는 지지기구의 열변형에 의해 약 0.15 μm 및 0.5 arcsec 이내의 측정정밀도로 운동오차의 측정이 가능함을 확인하였다.

참고문헌

1. Hewlett Packard Co., "Laser Measurement System User's Guide," Manual Part No. 00528-90010, 1984.
2. Fung, E. H. K., and Yang, S. M., "An approach to on-machine motion error measurement of a linear slide," Measurement, Vol. 29, pp. 51-62, 2001.
3. Kiyono, S., "Profile Measurement Using Software Datums," J. of JSPE, Vol. 61, No. 8, pp. 1059-1063, 1995.
4. Nagata, T., Ohori, M., Tani, Y., Sato, H., and Suzuki, K., "A study on Ultra Precision Straightness Measurements by Sequential Two Point Methods," SEISAN-KENKYU, Vol. 42, No. 6, pp. 353-356, 1990.