

## 정밀 공작기계 안내면의 평행도 측정

황주호\*, 박천홍(한국기계연구원), Wei Gao(Tohoku Univ.), 김승우(KAIST)

### Parallelism Measurement for Guide Rails of Precision Machine Tools

J.H. Hwang\*, C.H. Park(KIMM), W. Gao(Tohoku Univ.) S.-W. Kim (KAIST)

#### ABSTRACT

The guide-ways of precision machine tools are one of important element of machine tools. It has usually a pair of surfaces for constraint of one direction with bearing. In the case of precision machine tools, non-contact bearing such as hydrostatic bearing and aerostatic bearing is adopted usually. In this case, profiles of rails has effect on straightness and the clearance of bearing has effect on stiffness of guide way, which changes to higher if clearance changes to smaller. The clearance is varied along moving table according to relative distance of pair of rails. The relative distance of pair of rail can be divided by three properties. First and second properties are straightness of each pair of rail and bearing pad. And, third is parallelism about pair of rails and pairs of bearing pad. There are several methods for measuring straightness of each surface such as reversal method, sequential two point method, and way straightness. These straightness measuring methods are always acquiring deviation of profile from eliminating linear fitted inclined line and don't have the information of parallelism. Therefore, to get the small clearance for high stiffness, the straightness of rail and bearing pad and parallelism about pair of rails and pair of bearing pads are measured for correction such as regrinding, reassembling and lapping.

In this research, new and easy method for measuring parallelism of pair of rails is suggested. Two displacement probe and sensor stage, which is carry on the displacement sensor, are needed. The simulation and experiment was accomplished about pair of horizontal guide way to confirm the measurement of parallelism. And, the third probe is added to measure the straightness of each rails by sequential two point method. From the estimation of combined these two methods, it is confirmed that the profiles of a pairs of rails can be measured.

**Key Words :** Parallelism(평행도), straightness(진직도), guide-way(안내면), precision machine tools (정밀 공작기계)

#### 1. 서론

공작기계의 이송계는 높은 정밀도가 요구되는 가장 중요한 요소 중 하나이다. 정밀 공작기계용 이송계는 높은 강성을 가지고 직선운동 방향 이외의 운동을 구속하기 위하여 2 쌍의 안내면과 유정압이나 공기정압 베어링으로 대표되는 비접촉 베어링을 일반적으로 사용한다. 이러한 경우 두 안내면 형상은 운동정밀도에, 베어링과 안내면의 공차에 의한 윤활 간극은 강성에 영향을 주며, 안내면간의 상대거리는 안내면의 진직도와 상호간의 평행도에 의하여 결정되게 된다. 각 안내면의 진직도 측정은

반전법, 축차 2 점법<sup>1,2</sup>, 3 점법<sup>3,4</sup> 등 여러가지 측정 방법 등이 존재하며, 각기 독립적으로 측정을 수행하기 때문에 두 안내면간의 평행도는 측정하지 못하는 단점이 있다. 초정밀가공기의 고강성화를 위한 선진제품의 간극은 공기정압 방식의 경우 5 $\mu$ m 이내로 간극을 유지해야 하기 때문에, 고정밀 고강성 이송계 달성을 위하여 평행도 측정 방법에 대한 정립이 필요하다. 하지만, 평행도 측정에 대한 연구는 찾아 보기 힘들며, 블록 케이지 등에 의한 간접 측정 방법 등이 사용되고 있다.

본 논문에서는 초정밀 가공기용 안내면의 평행도 측정을 위한 2 개의 대칭인 변위 센서를 구성하였으며 두 안내면의 프로파일을 동시 측정 하기 위

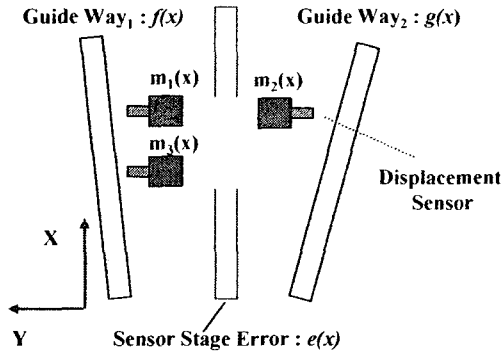


Fig. 1 Schematic diagram of equipment for measuring parallelism and profile of rails

하여 한 개의 센서 더하여 총 3 개의 변위 센서를 이용한 측정 방법을 제안 하였다. 방법의 타당성 검증을 위하여 기지의 안내면에 대한 평행도 및 진직도 측정 알고리즘에 대한 수치계산적 검증을 수행하였으며, 평행도 측정에 대한 기지의 각도 변화에 대하여 평행도의 변화가  $0.5\mu\text{rad}$  정도의 오차를 가지고 측정 할 수 있음을 확인 하였다.

## 2. 평행도 측정 알고리즘

측정 방법에 대한 개략도를 Fig. 1 에 도시하였다. 마주보는 2 개의 안내면에 대한 평행도 측정을 위하여 두개의 변위 센서와 이를 장착하여 안내면 방향으로 움직이면서 스캔하는 센서 스테이지를 이용한다. 이때 안내면 1 의 형상을  $f(x)$ , 센서의 신호를  $m_1(x)$ , 안내면 2 번의 형상을  $g(x)$  측정 신호를  $m_2(x)$ 라고 하였을 때  $i$  번째 측정 점에서의 측정 신호는 (1)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} m_1(x_i) &= f(x_i) + e(x_i) \\ m_2(x_i) &= -(g(x_i) + e(x_i)) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,  $e(x_i)$ 는 스테이지의  $m_1$  및  $m_2$  지점에서의 오차를 나타내며  $m_2(x_i)$  신호에 앞에 있는 음의 부호는 +y 방향을 양의 값으로 하기 위한 계인 값이고, 변위센서의 방향성에 따라 달라 질 수 있다. 두 식의 합으로부터 식(2)와 같은 식을 구할 수 있으며, 이로부터 평행도  $P(x_i)$ 는 식(2)와 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} P(x_i) &= m_1(x_i) + m_2(x_i) \\ &= f(x_i) - g(x_i) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i P(x_i) - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n P(x_i)}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad (3)$$

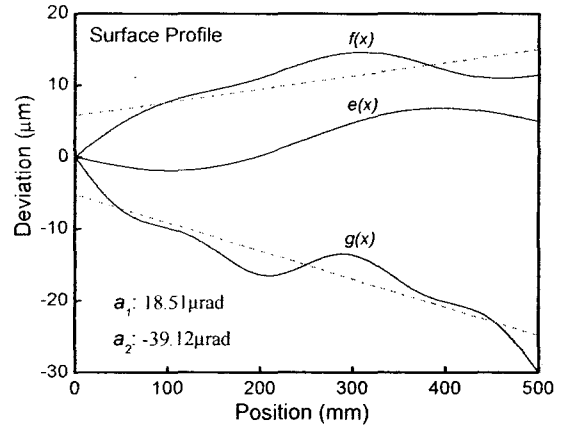


Fig. 2 Surface profiles of rails

$p(x_i)$ 는 두 안내면의 프로파일의 편차이며, 두 안내면의 대표 기울기는 최소자승법에 의하여 식 (3) 과 같이 구하여 진다.

식 (2)를 식(3)에 대입하면 식(4)와 같이 변화된다.

$$\alpha = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i f(x_i) + n \sum_{i=1}^n x_i f(x_i) - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n g(x_i) - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n g(x_i)}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad (4)$$

$$= a_1 - a_2$$

여기서  $a_1$  및  $a_2$  는 각각  $f(x)$  및  $g(x)$ 이 이루는 직선 기울기이다. 이는 각각의 면의 기울기의 차와 같음을 알 수 있다.

측정 방법의 이론적 검증을 위하여, 두 안내면 및 스테이지의 오차를 알고 있다고 가정하여 각각 식(5)과 같이 정의 하였으며, 이때의 프로파일은 Fig. 2 에 도시하였다.

$$\begin{aligned} f(x) &= 6 \sin\left(0.6 \frac{x}{L} 2\pi\right) + \sin\left(2 \frac{x}{L} 2\pi\right) + 0.03x \\ g(x) &= -5 \sin\left(\frac{x}{L} 2\pi\right) + 1.5 \sin\left(3 \frac{x}{L} 2\pi\right) - 0.06x \\ e(x) &= -3 \sin\left(\frac{x}{L} 2\pi\right) + 0.01x \end{aligned} \quad (5)$$

여기서  $L$  은 500mm,  $x$  는 이동거리 이며 형상 변화의 크기는  $\mu\text{m}$  단위로이다.  $f(x)$  및  $g(x)$ 가 이루고 있는 기울기는 식(3)를 이용하여 구한경우  $a_1 = 18.51\mu\text{rad}$ ,  $a_2 = -39.12\mu\text{rad}$  이 되며 Fig.2 에 점선으로 나타내었다. 또한 식(5)에 의한  $f(x)-g(x)$  기울기  $\alpha$ 는 Fig. 3 의 점선의 기울기로서  $57.63\mu\text{rad}$  이다. 이는 Fig. 2 의  $a_1 - a_2$  의 기울기와 같음을 알 수 있으며 식(4)가 잘 만족하는 것을 알 수 있다.

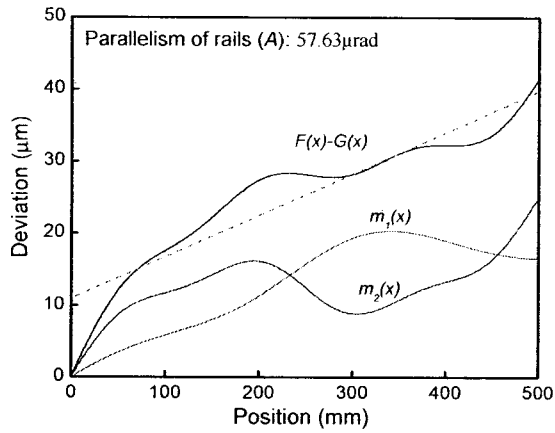


Fig. 3 Parallelism of rails

### 3. 평행도 측정 실험

검증을 위하여 Fig. 4 에 보이는 바와 같이 2 개의 레일을 이송스테이지에 평행하게 장착하여 500mm 구간을 움직이며 1mm 간격으로 측정하였다. 식(2)에 의하여 측정된 결과는 실선으로 나타내었다. 초기 장착했을때의 평행도 오차는 Fig. 5의 (a)의 점선으로 표시되며  $-16.95\mu\text{rad}$  임을 알 수 있다. 이로부터 구한 값을 기준으로  $16.95\mu\text{rad}$  만큼 레일을 회전시켰다. 회전량은 레일의 양쪽 끝을 2개의 변위센서를 장착하여 상대변위를 떨어진 거리로 나누어서 구하였으며, 조정 후 다시 측정한 결과를 Fig. 5(b)에 나타내었다. 회전 후의 평행도 오차는  $0.46\mu\text{rad}$  임을 알 수 있으며 이로부터 평행도 측정 방법이 효과적임을 알 수 있다. 회전 시킨양의 정확한 오차를 알 수 없기 때문에, 정확한 회전 변화를 측정하고 검증 할 수 있는 방법이 필요한 것으로 보여진다.

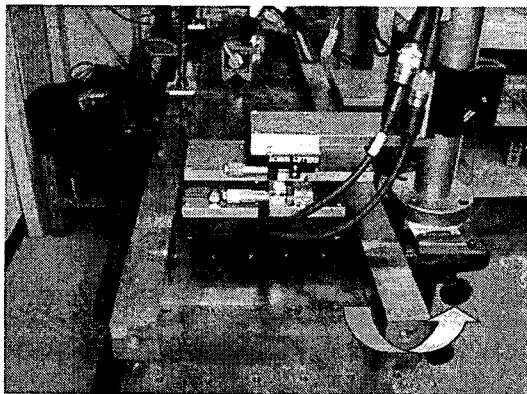


Fig. 4 Experimental setup

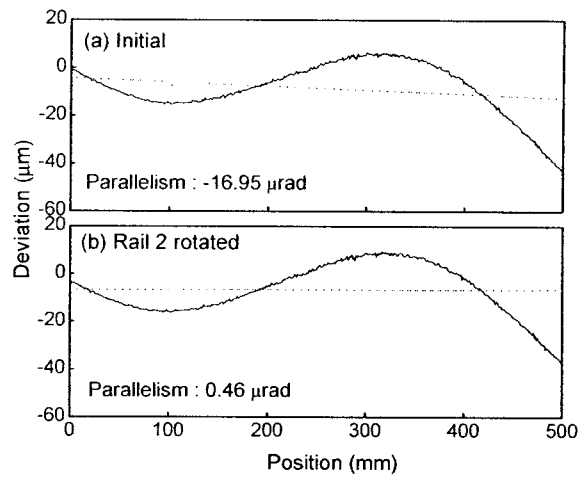


Fig. 5 Experimental results of measuring parallelism

### 4. 축차 2 점법에 의한 진직도 측정

정밀 공작기계의 평행도를 측정하여 수정할 때 동시에 고려되어야 할 것이 안내면의 진직도이다. 진직도 동시측정을 위하여, Fig. 2에 보이는 바와 같이 세번째의 센서를 부착하여 축차 2 점법에 의하여 구할 수 있다. 센서에서 얻어지는 신호  $m_3(x)$ 와  $m_1(x)$  사이에 식(6)와 같은 관계가 성립된다.

$$\begin{aligned} m_1(x_i) &= f(x_i) + e(x_i) \\ m_3(x_i) &= f(x_{i-1}) + e(x_i) - l\theta_y(x_i) \end{aligned} \quad (6)$$

여기서  $l$ 은 두 센서간의 거리,  $\theta_y$ 는 센서스테이

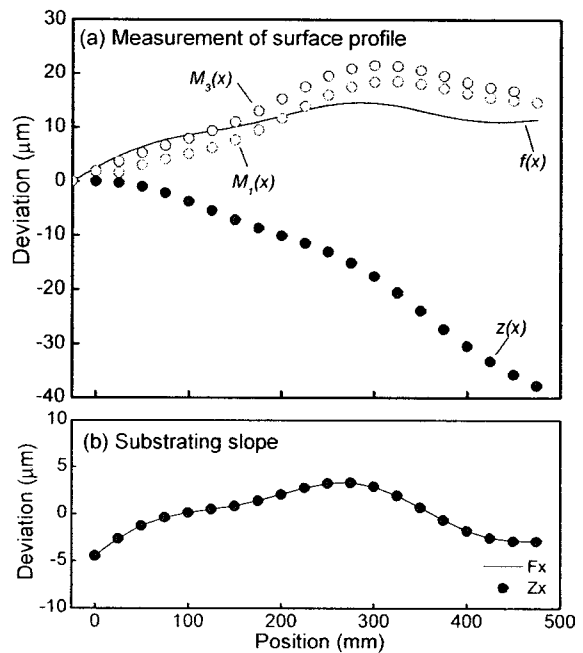


Fig. 6 Straightness profile using sequential two point method

지의 yaw 오차이다. 측정간격은 두 센서간의 거리  $l$  간격으로 측정된 것이며 식(6)에서부터 다음과 같은 관계식을 구할 수 있다.

$$z(x) = \sum_{i=0}^n (m_1(x_i) - m_2(x_i) + l\theta_y(x_i)) \approx f(x) \quad (7)$$

방법의 유효성을 살펴보기 위하여 Fig. 2의 형상을 갖는 안내면 및 스테이지에 대하여 각 운동오차에 의한 영향은 없는 것으로 가정하여 측정된 값은 식(6)에 의한 것으로 두고, 식(7)에 의하여 구한 안내면의 진직도를 Fig. 6(a)에 도시하였다. 센서의 거리를 25mm로 가정하였으며, 따라서 Fig. 2의  $x=25\text{mm}$  지점에서부터 측정을 수행하여 총거리는 475mm가 된다. 축차 2점법에 의하여 측정된 값은 그림에서 보이는 바와 같이 기울어짐 정도는 알 수 없으며, 실제 값과의 비교를 위하여 기지의 형상과 측정에 의한 형상에 대한 기울기를 최소자승법에 의하여 구한 결과를 Fig. 6(b)에 도시하였다. 그림에서 보이는 바와 같이 기울기를 제거 한 후의 안내면의 진직도는 거의 일치함을 알 수 있다.

### 5. 안내면 형상 동시 측정

식(7)에 의하여 구하여진  $Z(x)$ 는 식(2)로부터 구한 결과에 의하여  $g(x)$ 를 구할 수 있으며 이로부터 구한 값을  $g_2(x)$ 로 두었을 때 기지의 실제 안내면의 값과의 비교를 Fig. 7에 도시하였다. Fig. 6에 보이는 바와 같이 두 값이 기울기 차이에 의하여 오차로 인하여 랩핑등의 수정값을 정확히 알 수 가 없

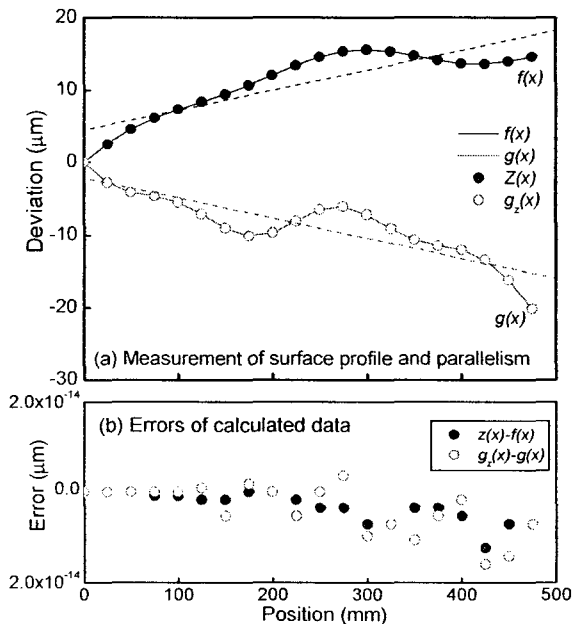


Fig. 7 Rotated Profile of a pair of rails

기 때문에 이를 위하여,  $z(x)$ 와  $g_2(x)$ 의 기울기를 각각 구하여 둘의 평균이 0이 되도록 같은 값만큼 회전 시킨 결과를 이다. 또한 기지의 profile과의 비교를 위하여  $a_1$ 과  $a_2$ 의 평균이 0이 되도록 같은 크기 만큼 같이 회전 시킨 값을 실선으로 함께 도시하였다. 실선으로 표시된 기지의 값과 식(2) 및 식(7)에 의한 추정에 의한 값의 차이를 Fig. 7의 (b)에 나타내었다. 보이는 바와 같이 오차가  $\pm 2 \times 10^{-14} \mu\text{m}$  이내로서 오차가 거의 없음을 알 수 있다. 따라서 측정 알고리즘에 의한 오차는 거의 없음을 알 수 있다. 진직도 측정에 의한 양 안내면의 형상 동시 측정에 대한 실험적 검증은 향후에 추진할 예정이다

### 6. 결론

본 논문에서 2개의 쌍을 이루는 정밀공작기계용 안내면을 평행도와 진직도로 분리하여 양 안내면의 기울어짐을 포함한 프로파일을 구하는 방법을 제안하였다. 제안된 방법의 검증은 위하여 기지의 안내면에 관하여 수치적 비교를 하였으며, 평행도 측정 알고리즘은 실험적 검증도 병행 하였다. 실험 및 수치적 검증으로부터 제안된 방법의 타당성을 검증하였다. 향후 양 안내면의 형상 동시 측정에 대한 실험적 검증을 연구할 계획이다.

### 후 기

본 연구는 산업자원부에서 주관하는 "대면적 미세형상의 초정밀/지능화 가공원천기술개발"과제의 지원에 의해 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

### 참고문헌

1. Kiyono, S., "Profile Measurement Using Software Datums," J. of JSPE, Vol. 61, No. 8, pp. 1059-1063, 1995.
2. Gao, W., and Kiyono, S., "High accuracy profile measurement of a machined surface by the combined method," Measurement, Vol. 19, No. 1, pp. 55-64, 1996.
3. 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.
4. Kounosu, K., and Kishi, T., "Measurement of Surface Profile Using Smoothed Serial Three Point Method," J of JSPE, Vol. 61, No. 5, pp. 641-645, 1995.