

초정밀 안내면 레일의 평행도 및 진직도 동시측정

황주호[#], 박천홍^{*}, 高偉^{**}, 김승우^{***}

Parallelism and Straightness Measurement of a Pair of Rails for Ultra Precision Guide-ways

JooHo Hwang[#], Chun-Hong Park^{*}, Wei Gao^{**} and Seung-Woo Kim^{***}

ABSTRACT

This paper describes a three-probe system that can be used to measure the parallelism and straightness of a pair of rails simultaneously. The parallelism is measured using a modified reversal method, while the straightness is measured using a sequential two-point method. The measurement algorithms were analyzed numerically using a pair of functionally defined rails to validate the three-probe system. Tests were also performed on a pair of straightedge rails with a length of 250 mm and a maximum straightness deviation of 0.05 μm , as certified by the supplier. The experimental results demonstrated that the parallelism-measurement algorithm had a cancellation effect on the probe stage motion error. They also confirmed that the proposed system could measure the slope of a pair of rails about 0.06 μrad . Therefore, by combining this technique with a sequential differential method to measure the straightness of the rails simultaneously, the surface profiles could be determined accurately and eliminate the stage error. The measured straightness deviation of each straight edge was less than 0.05 μm , consistent with the certified value.

Key Words : Parallelism(평행도), Straightness(진직도), Ultra precision guide-ways (초정밀 안내면), Reversal method (반전법), Sequential two point method (축차 2 점법)

1. 서론

초정밀 안내면은 높은 정밀도가 요구되는 초정밀 가공기, 반도체 장비 및 디스플레이 패널 반송장비 등의 이송 유니트에 사용되는 가장 중요한 요소 중 하나이다. 안내면은 높은 강성을 가지고 직선운동 방향 이외의 운동을 구속하기 위하여 한

쌍의 레일과 유정압이나 공기정압 베어링으로 대표되는 비접촉 베어링을 일반적으로 사용한다. 두 레일의 형상은 운동정밀도 및 윤활 간극에 영향을 준다. 유체베어링의 강성은 윤활간극의 세제곱에 비례하기 때문에 레일의 상대거리의 변화인 평행도를 일정수준 안에 들어오게 하는 것이 초정밀 안내면용 레일에서 요구된다. 또한 레일이 굽어져

접수일: 2006 년 10 월 3 일; 게재승인일: 2006 년 12 월 22 일

교신저자: 한국기계연구원 지능기계연구센터 초정밀기계팀

E-mail JooHo@kimm.re.kr Tel. (042) 868-7119

* 한국기계연구원 지능기계연구센터 초정밀기계팀

** Dept. of nanomechanics, Tohoku University, Japan

*** KAIST 기계공학과

있는 정도를 나타내는 진직도는 이송테이블의 진직도에 직접적 영향을 주므로 엄격한 관리가 필요하다. 각 레일의 진직도 측정은^{1,2} 반전법³⁻⁵, 축차 2 점법⁶⁻¹¹, 다점법¹²⁻¹⁷ 등 여러가지 측정 방법을 이용하여 측정할 수 있으나, 한 쌍의 레일의 진직도를 구함에 있어서 각각 독립적으로 측정을 수행한 후 기울기를 제거하기 때문에 두 레일간의 상대거리를 측정하지 못하는 단점이 있다. 일반적으로 초정밀 안내면을 제작하는 현장에선 기존의 방법을 이용하여 각 레일의 진직도를 측정함과 동시에 블록 게이지 등에 의한 간접측정 방법 등에 의한 평행도 측정을 병행하고 있으며, 시חק오법에 의하여 상대 거리를 구하기 때문에 많은 시간을 요할 뿐만 아니라, 블록게이지 사용에 따른 정량화가 어렵고, 측정 정밀도의 신뢰도가 떨어져 초정밀 고강성 안내면 구현이 힘들다. 따라서, 진직도 뿐만 아니라 평행도 측정 방법에 대한 정립이 필요하다.

본 논문에서는 초정밀 안내면용 레일의 평행도와 진직도를 동시측정하기 위하여 3 개의 probe 를 이용한 측정 시스템을 제안 하였다. 방법의 타당성 검증을 위하여 기지의 레일에 대한 평행도 및 진직도 측정 알고리즘에 대한 수치계산적 검증을 수행하였으며, 0.05 μm 급 straight edge 를 대상으로 실험을 수행하였다.

2. 평행도 측정

2.1 안내면의 평행도 측정 알고리즘

초정밀 안내면에 일반적으로 많이 사용되는 마주보는 한 쌍의 레일의 측정에 대한 개략도를 Fig. 1 에 도시하였다. 마주보는 2 개의 레일에 대

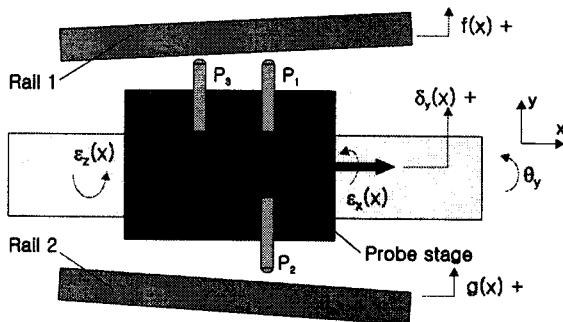


Fig. 1 Setup for horizontal rails

한 평행도 측정을 위하여 두 개의 변위 센서와 이를 장착하여 축 방향으로 움직이면서 측정하는 프루브 스테이지를 이용하였다. 이때 레일 1 의 형상을 $f(x)$, P_1 의 측정데이터를 $m_1(x)$, 레일 2 의 형상을 $g(x)$, P_2 의 측정 데이터를 $m_2(x)$ 라고 하였을 때 i 번째 측정 점에서의 측정 데이터는 식(1)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} m_1(x_i) &= f(x_i) - e_1(x_i) \\ m_2(x_i) &= -(g(x_i) - e_2(x_i)) \\ e_1(x_i) &= \delta_y(x_i) + t_{x1}\epsilon_z(x_i) - t_{z1}\epsilon_x(x_i) + \theta_y \cdot x_i \\ e_2(x_i) &= \delta_y(x_i) + t_{x2}\epsilon_z(x_i) - t_{z2}\epsilon_x(x_i) + \theta_y \cdot x_i \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, $e_1(x_i)$ 및 $e_2(x_i)$ 는 probe 스테이지의 오차며, $\delta_y(x_i)$, $\epsilon_z(x_i)$, $\epsilon_x(x_i)$ 및 θ_y 는 각각 probe 스테이지의 y 방향 straightness, yaw 오차, Roll 오차 및 스테이지의 장착 기울기를 나타내고, t_{x1} , t_{x2} , t_{z1} 및 t_{z2} 는 각각 x 및 z 방향의 회전운동 중심에서부터 센서위치까지의 거리가 된다. $m_2(x_i)$ 신호에 앞에 있는 음의 부호는 +방향을 양의 값으로 하여서 생긴 음의 계인 값이고, 변위센서의 방향성에 따라 달라질 수 있다. 식(1)의 두 측정값의 합은 식(2)로 표현되며, $t_{x1}=t_{x2}$, $t_{z1}=t_{z2}$ 로 센서를 설치한 경우 $e_1(x_i)=e_2(x_i)$ 의 관계가 성립되어 스테이지에 의한 오차는 상쇄되어 두 레일의 상대거리의 변화만 남게 된다.

$$\begin{aligned} p(x_i) &= m_1(x_i) + m_2(x_i) \\ &= f(x_i) - g(x_i) - e_1(x_i) + e_2(x_i) \\ &= f(x_i) - g(x_i) \end{aligned} \quad (2)$$

식 (2)의 $p(x_i)$ 는 x 방향을 따라 측정한 레일 값의 상대거리의 편차가 된다. 이것은 두 레일의 프로파일의 편차이며, 두 레일의 기울기 값은 최소자승법에 의하여 식(3) 과 같이 구하여 진다.

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

식 (2)를 식(3)에 대입하여 식(4)가 된다.

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

$$= a_1 - a_2$$

여기서, a_1 및 a_2 는 각각 $f(x)$ 및 $g(x)$ 이 이루는 직선 기울기이다. 배분 법칙이 성립하기 때문에 각 레일 기울기의 차임을 알 수 있다. 두 레일간의 평행도를 정의하는 방법 중 LS/LS 방식¹⁸은 기준면에 대한 영향이 없는 장점이 있으며 수치적으로 구할 수 있어 많은 측정기의 평행도 측정에 많이 사용된다. 최소자승법에 의하여 구하여진 각도에 의하여 정의되는 식(4)를 이용하여 구한 방법을 사용할 수 있다.

2.2 평행도 측정 알고리즘 수치 검증

측정 방법의 이론적 검증을 위하여, 2.1 절의 안내면에 대하여 두 레일 및 스테이지의 오차를 알고 있다고 가정하여 각각 식(5)과 같이 정의하였으며, 프로파일의 크기는 μm 단위이고 도시하면 Fig. 2 과 같이 나타난다.

$$f(x_i) = 6 \sin(0.6 \frac{x_i}{L} 2\pi) + \sin(2 \frac{x_i}{L} 2\pi) + 0.03x_i, \quad (5)$$

$$g(x_i) = -5 \sin(\frac{x_i}{L} 2\pi) + 1.5 \sin(3 \frac{x_i}{L} 2\pi) - 0.06x_i,$$

$$e_1(x_i) = e_2(x_i) = -3 \sin(\frac{x_i}{L} 2\pi) + 2 \sin(2.5 \frac{x_i}{L} 2\pi) + 0.02x_i,$$

여기서 $f(x)$, $g(x)$ 및 $e(x)$ 는 각각 레일의 형상, L 은 레일의 길이이며 500 mm로 두었다.

$f(x)$ 및 $g(x)$ 가 이루고 있는 기울기를 식(3)에 의하여 구하면 각각 $a_1=18.54 \mu\text{rad}$, $a_2=-39.24 \mu\text{rad}$ 이 되며 Fig. 2에 점선으로 나타내었다. 식(1)에 의한 두 센서의 이론적 측정값은 Fig. 3에 표시하였으며, 식(4)에 의한 $p(x)$ 는 $f(x)-g(x)$ 와 같고 기울기 α 는 Fig. 3의 점선의 기울기인 $57.78 \mu\text{rad}$ 로서 a_1-a_2 임을 알 수 있다.

3. 평행도 및 진직도 동시측정

3.1 측정 알고리즘

초정밀 안내면의 평행도를 측정하여 수정할

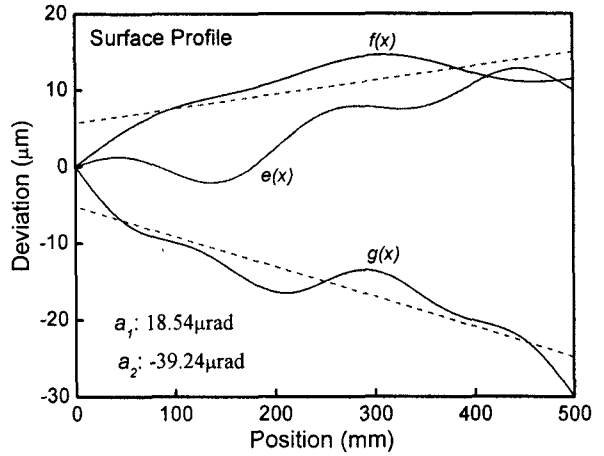


Fig. 2 Functionally defined surface profile for a pair of rails

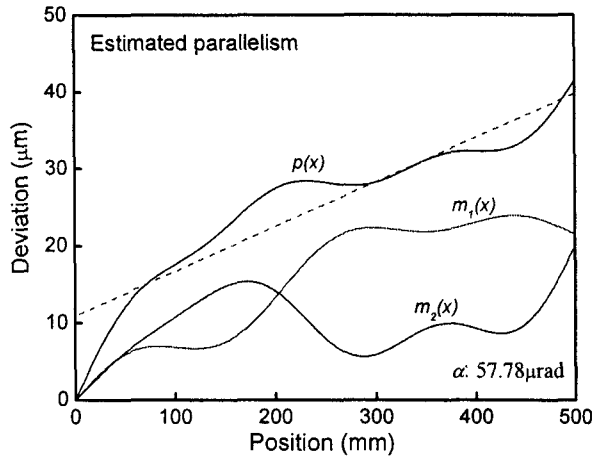


Fig. 3 Parallelism estimation of the pair of rails

때 동시에 고려되어야 할 것이 레일의 진직도이다. 레일의 진직도 동시측정을 위하여, Fig. 1에 보이는 바와 같이 세번째의 센서를 부착하여 측차 2점법에 의하여 구할 수 있다. P_1 및 P_3 에서 얻어지는 신호 $m_1(x_i)$ 와 $m_3(x_i)$ 사이엔 식(6)와 같은 관계가 성립된다.

$$\begin{aligned} m_1(x_i) &= f_d(x_i) - e_1(x_i) \\ m_3(x_i) &= f_d(x_{i-1}) - e_3(x_i) \\ e_3(x_i) &= \delta_y(x_i) + t_{x3}e_2(x_i) - t_{z3}e_x(x_i) + \theta_y \cdot x_i \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, $f_d(x)$ 는 $m_1(x)$ 및 $m_3(x)$ 의 최초 측정 값을 0으로 하였을 때 상대변위에 의하여 구하여

지는 $f(x)$ 의 근사 값이 된다. 측정간격은 두 센서 간의 거리 l 간격으로 측정된 것이며 $l=t_{x1}-t_{x3}$ 이고 $t_{x1}=t_{x3}$ 의 관계가 성립되어 식(2)와 식(8)에서부터 다음과 같은 관계식을 구할 수 있다.

$$f(x_i) \approx f_d(x_i) = m_1(x_i) - m_3(x_i) + f_d(x_{i-1}) + l\varepsilon_z(x_i)$$

$$g_d(x_i) \approx f_d(x_i) - P(x_i) \quad (7)$$

여기서, $g_d(x_i)$ 는 $f_d(x)$ 로부터 추정된 rail₂의 형상이다.

3.2 동시측정 알고리즘 수치 검증

방법의 유효성을 살펴보기 위하여 Fig. 2의 형상을 갖는 레일 및 스테이지에 대하여 각 운동오차에 의한 영향은 없는 것으로 가정하여 식(5)의 식에서 $e_3(x)$ 대신 $e_1(x) = e_3(x)$ 의 관계가 성립되었을 때 식 (7)에 의하여 구한 레일의 형상을 Fig. 4(a)에 도시하였다. 센서의 거리를 25mm로 가정하였으며, 따라서 Fig. 2의 $x=25mm$ 지점에서부터 측정을 수행하여 총거리는 475mm가 된다. 식(7)에 의하여 계산된 $f_d(x)$ 값은 Fig. 4(a)에 보이는 바와 같이 $f(x)$ 와 비교하였을 때 유사한 형태를 보이지만 기울기가 다름을 알 수 있다. 정의된 수치 값과의 비교를 위하여 식(5)의 기지의 형상과 측정에 의한 형상에 대한 기울기를 최소자승법에 의하여 구

한 후 기울기를 제거한 결과를 Fig. 4(b)에 도시하였다. 그림에서 보이는 바와 같이 기울기를 제거한 후의 레일의 진직도는 일치함을 알 수 있다.

각각의 레일의 정확한 기울기는 알 수 없지만 안내면의 성능을 좌우하는 두 레일 간의 상대거리 및 기울기는 식(2) 및 (4)에 의하여 알 수 있다. 측정된 레일을 래핑 등의 방법으로 수정할 경우 각 레일의 기울기도 수정 대상이 되므로, Fig. 4(a)에 보이는 바와 같은 결과에 대하여 래핑등 수정의 작업을 수행하여야 하기 때문에 각각의 레일에 대한 수정량이 최소가 되도록 그래프상에 표시하여 주도록 하였다. 따라서, $f_d(x)$ 와 $g_d(x)$ 의 기울기를 각각 구하여 같은 값만큼 회전시켜 $a_1 = -a_2$ 가 되도록 표시하여 이때의 결과를 Fig 5(a)에 도시하였다. 또한 식(5)에 의하여 정의된 형상과의 비교를 위하여 $f(x)$ 와 $g(x)$ 도 마찬가지로 $a_1 = -a_2$ 가 되도록 같은 크기만큼 같은 방향으로 회전 시킨 값을 실선으로 함께 나타내었다. 실선으로 표시된 기지의 값과 식(2) 및 식(7)에 의하여 구하여진 값의 차이를 Fig. 5(b)에 나타내었다. 보이는 바와 같이 오차가 $\pm 2 \times 10^{-14} \mu m$ 이내로서 수치 적분에 의한 오차만 존재함을 알 수 있다. 이로부터 제시된 알고리즘이 한 쌍을 이루고 있는 레일의 평행도 및 진직도 동시측정에 적합함을 확인 할 수 있다.

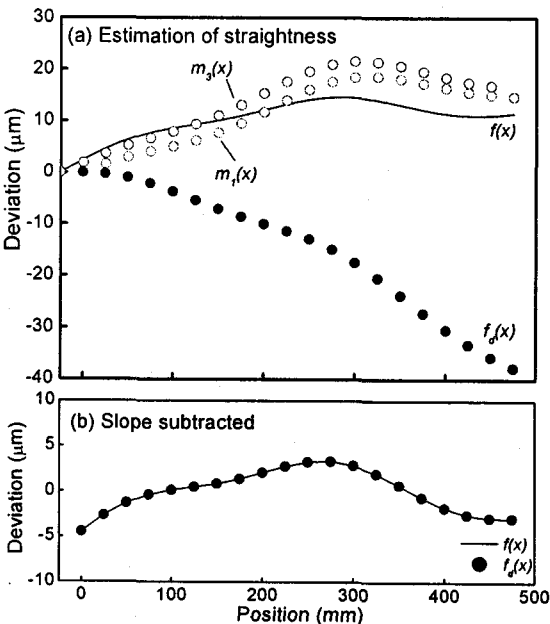


Fig. 4 Straightness estimation of rail¹

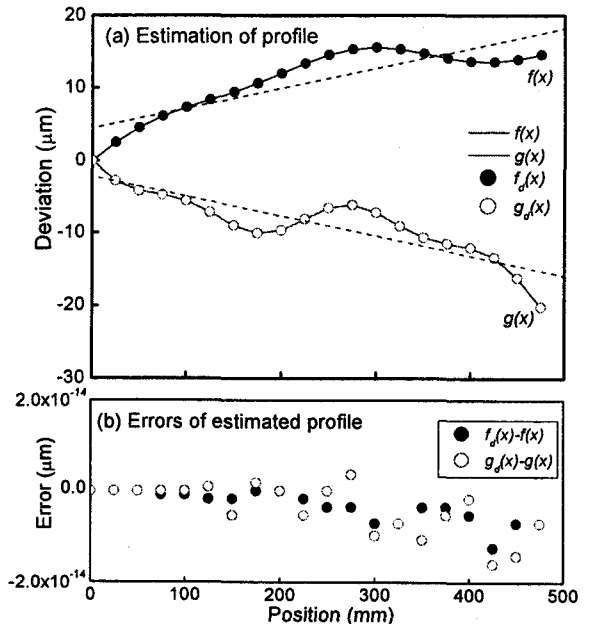


Fig. 5 Profile estimation of a pair of rails

3.3 평행도 및 직직도 동시측정 실험

제안된 방법을 이용하여 측정상의 probe 스테이지의 오차를 제거하여 원하는 레일의 형상을 측정할 수 있는지 여부를 실험적으로 검증하기 위하여, $0.05 \mu\text{m}$ 이내의 진직도를 갖는 2 개의 straight edge 를 Fig. 6 에 보이는 바와 같이 설치하여 측정 대상인 레일로 두었으며, 3 개의 정전용량형 probe (ADE 사, Microsense 3401)를 $0.5 \mu\text{m}$ 이내의 진직도를 갖는 초정밀 프루브 스테이지에 부착하여 측정을 수행하였다. 측정은 P_1 과 P_3 간의 거리인 $l=17 \text{ mm}$ 간격으로 수행하였으며, yaw 오차(ϵ_2)를 측정하기 위하여 레이저간섭계 시스템의 angular optic 을 사용하였다. 3 회의 실험을 수행하여, 평균값을 이용하여 결과를 분석하였다.

P_1 과 P_2 의 측정 데이터 $m_1(x)$, $m_2(x)$ 및 이로부터

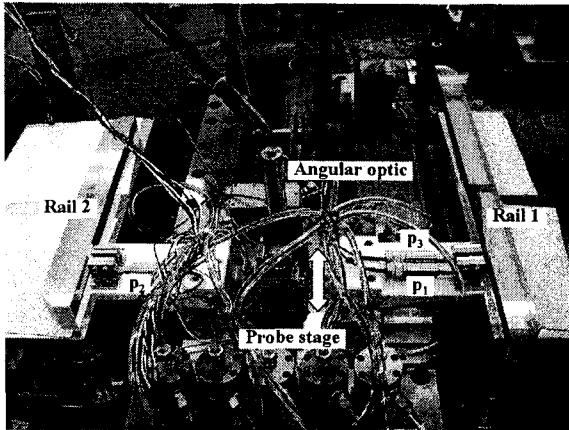


Fig. 6 Experimental setup for simultaneous measurement of parallelism and straightness

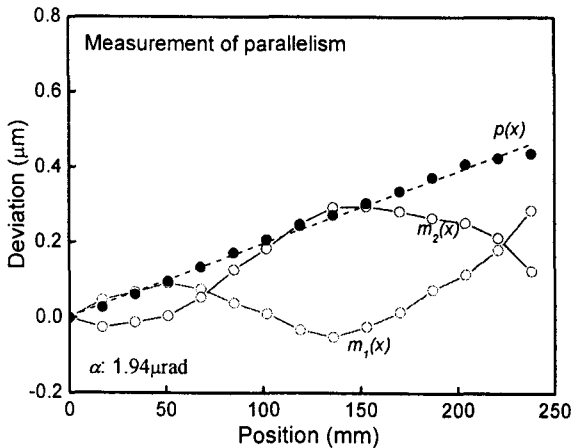


Fig. 7 Parallelism measurement of a pair of rails

터 계산된 두 레일의 평행도를 Fig. 7 에 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 측정 데이터는 probe 스테이지의 오차에 의하여 약 $0.3 \mu\text{m}$ 의 변동이 있는 것을 알 수 있으며, 식(2)에 의하여 구하여진 평행도 측정 값 $p(x)$ 는 스테이지의 오차가 효과적으로 상쇄되어 직선에 가까운 값을 보임을 알 수 있다.

측정된 $m_1(x)$, P_3 의 데이터 $m_3(x)$ 및 $l \cdot \epsilon_2$ 로부터 식

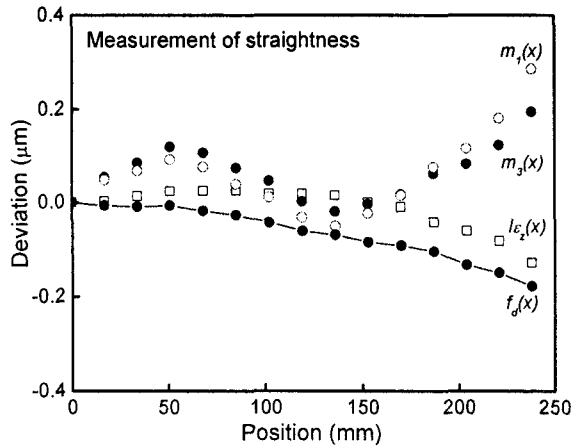


Fig. 8 Straightness measurement of rail¹

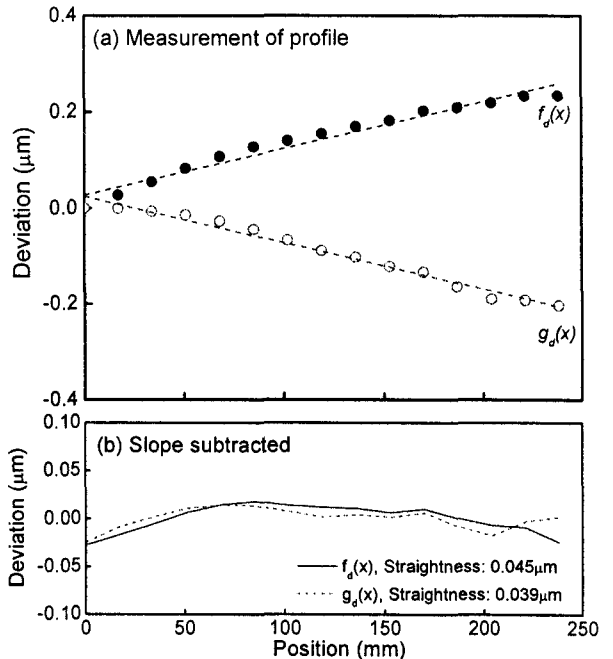


Fig. 9 Simultaneous measurement of profile of a pair of rails

(7)를 이용하여 구한 $f_d(x)$ 를 측정 데이터들과 함께 Fig. 8 에 도시하였다. 그림에서 보이는 바와 같이 스테이지의 오차에 의한 측정값 들이 식(7)에 의하여 상쇄되어 일직선에 가까운 레일의 형상을 측정 할 수 있음을 알 수 있다. 그러나, Fig. 4(a)의 경우에서의 마찬가지로 정확한 기울기는 알 수 없다. 기울기는 Fig. 5(a)에서와 마찬가지로 최소 자승법에 의하여 $f_d(x)$ 와 $g_d(x)$ 의 기울기를 각각 구하

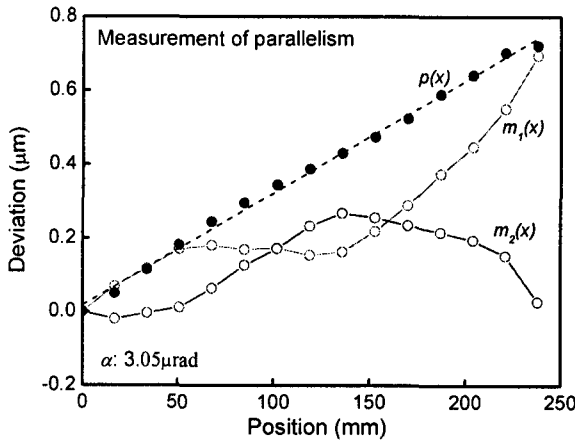


Fig. 10 Parallelism measurement of a pair of rails after rotation

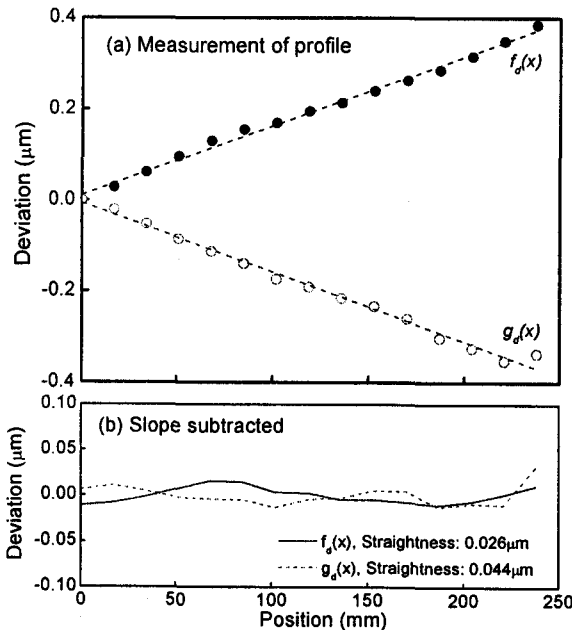


Fig. 11 Simultaneous measurement of profile of a pairs of rails after rotation

여 둘의 평균이 0 이 되도록 같은 값 만큼 회전 시키는 방법을 이용하여 Fig.9(a)에 도시하였다. Fig. 9(a)의 점선은 최소 자승법에 의하여 구하여진 직선을 나타내며, 레일 형상과 직선의 편차인 진직도를 Fig. 9(b)에 나타내었다. $f_d(x)$ 및 $g_d(x)$ 의 레일의 진직도는 각각 $0.045 \mu\text{m}$ 및 $0.039 \mu\text{m}$ 임을 알 수 있다.

평행도 측정 방법 및 측정데이터의 재현성 검증을 위하여 Rail₁의 Rail₂에 대한 Fig. 7의 기울기 $\alpha = 1.9 \mu\text{rad}$ 를 $1.05 \mu\text{rad}$ 가량 회전 시켜 $2.99 \mu\text{rad}$ 이 되도록 하였다. 회전량의 검증은 레일의 한쪽 부분을 회전 시킨 후 200 mm 떨어진 곳에 정전용량형 probe 를 설치하여 상대변위가 $0.21 \mu\text{m}$ 가 되도록 조절하여 확인 하였으며, 마찬가지로의 방법으로 3 회 측정을 수행하였다.

회전 후의 측정데이터 $m_1(x)$ 및 $m_3(x)$ 와 이로부터 구한 평행도 $p(x)$ 를 Fig. 10 에 도시하였다. 측정된 파형이 Fig. 7의 값과 유사한 파형을 가지고 있음을 알 수 있으며 rail₁의 회전에 따라 $m_1(x)$ 의 기울기가 커졌음을 관찰할 수 있다. 구하여진 평행도 $p(x)$ 는 Fig. 7의 실험의 경우와 마찬가지로 스테이지의 오차를 효과적으로 제거하는 것을 관찰 할 수 있으며, 기울기 α 는 $3.05 \mu\text{rad}$ 로서 rail₁의 회전시 예상되었던 $2.99 \mu\text{rad}$ 에 대하여 $0.06 \mu\text{rad}$ 의 차이를 보인다. 이는 평행도 측정 방법 및 rail₁의 회전량을 측정한 오차가 모두 포함되어 나타난 결과로 보여지며, 그 크기가 매우 작아 초정밀 안내면용 레일의 평행도 측정에 충분히 적용 가능할 것으로 예상된다. 회전 시킨 후 양 레일의 형상 측정 결과를 Fig. 11에 도시하였다. Fig. 11(a)에 보이는 바와 같이 Fig. 9(a)와 유사한 변동을 보이면서 회전에 의한 기울기 값만 많이 변화된 것을 알 수 있다. 기울기를 제거한 후의 Fig. 11(b)의 진직도 값을 Fig. 9(b)의 것과 비교하여 보면 크기는 유사하지만 형상은 다소 다를 수 있다. 이는 3 회 측정의 $f_d(x)$ 및 $g_d(x)$ 의 반복도가 $0.02 \mu\text{m}(4\sigma)$ 수준이어서 측정 상의 변동의 영향으로 보여진다. 이상의 실험으로부터 제안된 방법은 한 쌍의 초정밀 안내면용 레일을 측정 하는데 매우 유용한 방법임을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서 2 개의 쌍을 이루는 초정밀 안내

면용 레일의 평행도와 진직도를 동시 측정하여 형상을 구하는 방법을 제안하였다. 제안된 방법의 검증은 위하여 기지의 레일에 관하여 수치적 비교를 하였으며, 알고리즘 상의 완벽한 구현이 가능함을 확인 하였다. 평행도의 측정 검증은 회전실험적 검증을 위하여 진직도가 $0.05\mu\text{m}$ 수준인 2 개의 레일에 대하여 측정을 수행 하였으며, probe 스테이지의 오차가 효과적으로 제거 되어 원하는 양 레일의 형상이 측정 되는 것을 확인 하였다.

후 기

본 연구는 산업자원부에서 주관하는 "대면적 미세형상의 초정밀/지능화 가공원천기술개발"과제의 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- Gao, W., "Precision Nanometrology and Its Applications to Precision Nanosystems," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 6, No. 4, pp.14-20, 2005.
- Gao, W. and Park, C. H., "High Precision Measurement of Rotational Accuracy," *Journal of the KSPE*, Vol. 21, No. 8, pp.7-13, 2004.
- Donaldson, R. R., "A Simple Method for Separating Spindle Error from Test Ball Roundness Error," *Annals of the CIRP*, Vol. 21, pp.125-126, 1972.
- Estler, W. T., "Calibration and Use of Optical StraightEdges in the Metrology of Precision Machines," *Optical Engineering*, Vol. 24, pp. 372-379, 1985.
- Evans, C. J., Hocken, R. J. and Estler, W. T., "Self-calibration: Reversal, Redundancy, Error Separation, and Absolute Testing," *Annals of the CIRP* Vol. 45, No.2, pp. 617-634, 1996.
- Tanaka, H., Tazawa, K., Sato, H., O-hori, M. and Sekiguchi, H., "Application of a New Straightness Measurement Method to Large machine Tools," *Annals of the CIRP*, Vol. 30, No. 1, pp. 455-459, 1981.
- Tazawa, K., Sato, H. and O-hori, M., "A new Method for the Measurement of the Straightness of Machine Tools and Machined Work," *ASME Journal of Mechanical Design*, Vol. 104, pp. 587-592, 1982.
- Kiyono, S. and Gao, W., "Profile Measurement of Machined Surface with a New Differential Surface with a New Differential Method," *Precision Engineering*, Vol. 16, No. 3, pp. 212-218, 1994.
- 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.
- Makosch, G. and Drollinger, B., "Surface Profile Measurement with a Scanning Differential AC Interferometer," *Applied Optics*, Vol. 23-24, pp. 454-4553, 1984.
- Tanaka, H. and Sato, H., "Extensive Analysis and Development of Straightness Measurement by Sequential Two-point Method," *Transaction of the ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 108, pp. 176-182, 1986.
- 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.
- 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.
- Gao, W. and Kiyono, S., "On-machine Measurement of Machined Surface Using the Combined Three-Point Method," *JSME International Journal*, Vol. 40, No. 2, pp. 253-259, 1997.
- Gao, W., Yokoyama, J., Kojima, H. and Kiyono, S., "Precision Measurement of Cylinder Straightness Using a Scanning Multi-probe System," *Precision Engineering*, Vol. 26, No. 3, pp.279-288, 2002.
- Yamaguchi, J., "Measurement of Straight Motion Accuracy Using the Improved Sequential Three-point Method," *Journal of JSPE*, Vol. 59, No.5, pp. 773-778, 1993.
- Furukawa, M., Gao, W., Shimizu, H., Kiyono, S., Yasutake, M. and Takahashi, K., "Three-Dimensional Slit width Measurement for Long Precision Slit Die," *Key Engineering Materials*, Vols. 295-296, pp. 343-348, 2005.
- Thalman, R., "Intercomparison of parallelism measurements," *Measurement*, Vol. 17, pp. 17-27, 1996.