한국정밀공학회지 제 29 권 8 호 pp. 863-872 August 2012 / 863
Journal of the Korean Society for Precision Engineering Vol. 29, No. 8, pp. 863-872 http://dx.doi.org/10.7736/KSPE.2012.29.8.863

레이저 간섭계를 이용한 직각도 측정에 관한 분석

Analysis for the Squareness Measurement using Laser Interferometer

이동목 [1], 이훈희 [2], 양승한 [2,✉]
Dong-Mok Lee[1], Hoon-Hee Lee[2], and Seung-Han Yang[2,✉]

1 경북대학교 기계연구소 (Institute of Mechanical Engineering Technology, Kyungpook Nat'l Univ.)
2 경북대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Kyungpook Nat'l Univ.)
✉ Corresponding author: syang@knu.ac.kr, Tel: 053-950-6569

Manuscript received: 2012.3.21 / Accepted: 2012.6.5

The squareness measurement of driving axes of a machine tool is very important to evaluate the performance of the machine. Laser interferometer measurement system is one of the most reliable equipment to measure the squareness. However, squareness measurement using laser system with an optical square result in restriction of straightness optics setup and Abbe's offset. This offset combines with angular errors during the motion of an axis to cause Abbe's error. In addition, the difficulty in optical square setup causes restriction of other optics and limitation of measurable range. In this paper, mathematical approaches are presented to eliminate the Abbe's error and to estimate squareness for full range by using the best fit of straightness data measured without an optical square. Experiments for squareness measurement of 3 axis machine tool were conducted and the proposed techniques were used for squareness evaluation with elimination of Abbe's error and squareness estimation for the full travel range.

Key Words: Squareness Measurement (직각도 측정), Laser Interferometer (레이저 간섭계), Abbe's Error (아베 오차), Representative Line (대표 직선), Best Fit (최적 맞춤), Optical Square (광학 스퀘어)

기호설명

x_i = position of X axis, $i = 1,2,\ldots,n$
ε_{ij} = measured angular error in i-direction of j-axis, $i = x,y,z$, $j = x,y,z$ (*mrad*)
r_{ij} = data of straightness measurement in i-direction of j-axis, $i = x,y,z$, $j = x,y,z$ (μm)
m_{ij} = Abbe's error-eliminated data from r_{ij} in i-direction of j-axis, $i = x,y,z$, $j = x,y,z$ (μm)
δ_{ij} = straightness error estimated from representative line of measurement data in i-direction of j-axis, $i = x,y,z$, $j = x,y,z$ (μm)
a_{ij} = Abbe's offset in i-direction of j-axis, $i = x,y,z$, $j = x,y,z$ (*mm*)
e_{ij} = Abbe's error in i-direction of j-axis, $i = x,y,z$, $j = x,y,z$ (μm)
s_{ij}, s_{ij}' = squareness of the i-j plane for measurable and full travel range respectively ($\mu m/m$)
α, β = inclination of representative line of measurement data from X, Y axis respectively ($\mu m/m$)
$\Delta\alpha$, $\Delta\beta$ = setup alignment difference between measurement systems (with & without optical square) at x, y axis respectively ($\mu m/m$)
α', β' = inclination of straightness error representative line (best fit curve) from x, y axis respectively ($\mu m/m$)
γ, γ' = angle between representative lines (measurement data) of X & Y axis for measurable and full travel range respectively ($\mu m/m$)

1. 서론

공작기계의 기하학적 오차는 이송계의 위치 정밀도에 직접적인 영향을 미치는 가장 큰 오차 요소이며 이러한 기하학적 오차를 측정하기 위해 PSD(Position sensing detector), 볼바(Double ball-bar) 및 정전용량 센서(Capacitive sensor) 등을 사용하는 간접적 방법 또는 레이저 간섭계를 사용하는 직접적 방법 등이 사용된다.[1-4] 특히 직각도는 체적 오차에 큰 비중의 영향을 미치는 반면, 측정과 분석은 다른 오차 성분들에 비해 상대적으로 까다롭다.[5] ISO 230[6] 표준에서는 직각마스터와 다이얼게이지, 마이크로미터 또는 레이저 간섭계 등을 사용하는 측정 방법이 규정되어 있으며, Lee[7]는 직각마스터 제작의 어려움과 레이저 간섭계 측정에 소요되는 시간 및 비용의 문제점을 제시하며 비전(Vision)과 마스터를 사용하여 직각도를 측정하는 방법을 제안하였다. Yuan[8]은 볼바를 사용하여 측정한 데이터에서 역기구학 분석 알고리즘을 제안하여 직각도를 추정하였으며, Lee[9]는 정전용량 센서를 활용한 다자유도 측정법을 제시하였다. 레이저 간섭계는 단일 오차 성분에 대해 높은 분해능으로 정밀한 측정이 가능해 최근 공작기계뿐만 아니라 CMM 과 같은 다양한 장비의 기하학적 오차 측정에 널리 사용하고 있으므로,[10,11] Renishaw 및 HP 등의 상용 측정기 제조사들은 직각도 측정을 위한 펜타프리즘 원리의 광학 스퀘어를 출시하였다.[12,13]

레이저 간섭계를 이용한 기하학적 오차 측정은 측정 불확도를 줄이기 위해 코사인 오차(Cosine error) 및 아베 오차(Abbe's error) 등 측정 오차를 최소화하는 설치 조건에서 수행하여야 한다.[14,15] 그러나 이송계의 이동 방향과 레이저 빔 방향의 불완전한 정렬이나 광학계 부품의 설치 공간 제약으로 인해 측정 오차 보상에 대한 추가적인 작업을 필요로 하며, 실제 측정기 제조사에서는 일부 오차에 대해 측정 불확도 제거를 위한 작업자의 데이터 처리 방법을 안내하고 있다. 특히 추가적인 데이터 처리는 직각도 측정에서 아주 중요하다. 광학 스퀘어(Optical square)는 측정 구조상 아베 옵셋을 필연적으로 발생시키며 이송 축의 각도 오차에 의해 아베 오차를 유발시킨다. 그리고 레이저 헤드(Laser head)와 진직도 반사경(Retro-reflector)뿐만 아니라 광학 스퀘어를 고정된 위치에 설치하여야 하기 때문에 진직도 측정용 간섭계(Straightness interferometer)의 설치 가능 영역이 줄어든다. 따라서 아베 옵셋의 영향과 비중이 증가하게 되며, 광학계 설치 영역의 감소는 간섭계의 이동 거리를 제한하게 되어 전체 이송 영역에 대한 직각도 측정을 힘들게 한다.

본 논문에서는 레이저 간섭계를 이용한 직각도 측정 시 필연적으로 발생하는 측정 오차 및 측정 범위의 문제점을 개선하기 위해 아래와 같은 방법을 제안한다.

- 광학 스퀘어의 설치로 인해 발생하는 아베 오차의 제거
- 최적 맞춤(Best fit)을 이용한 전체 이송 영역에 대한 직각도 추정

Renishaw 社의 XL-80 레이저 측정 시스템과 광학 스퀘어를 사용하여 3 축 공작기계의 XY 평면에 대한 측정 실험을 수행하고 제안한 방법을 사용한 직각도 평가 결과를 비교한다.

2. 레이저 간섭계를 이용한 직각도 측정

2.1 직각도 측정 방법

직각도는 기본적으로 두 축의 운동 방향에 대한 진직도 측정이 우선되어야 하며 측정된 두 진직도 데이터의 비교로부터 계산된다. 따라서 두

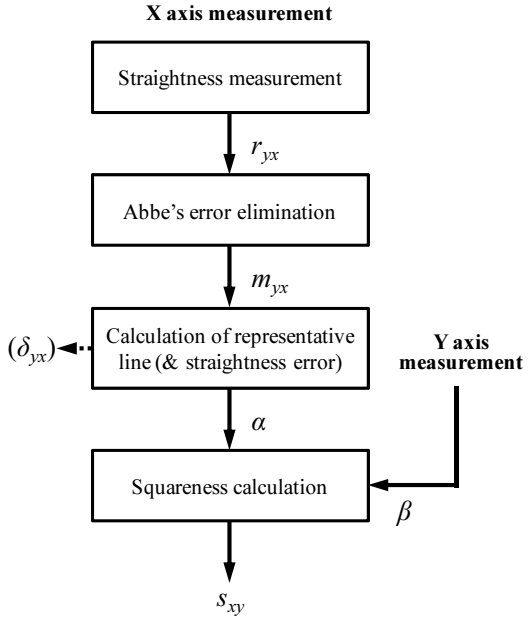


Fig. 1 Procedure for squareness evaluation

축에 대한 진직도 측정 시 상호 간 일치하는 측정 좌표계를 공유해야 하며 이를 위해 두 축의 직각 정렬을 나타내는 기준이 필요하다. 레이저 간섭계를 이용한 직각도 측정에서는 입사된 레이저 광선을 정확히 90°로 반사시키는 광학 스퀘어가 그 기준 역할을 담당한다.[16] 측정 방법으로 일단 두 축의 운동에 대해 최대한으로 측정이 가능한 영역에 광학 스퀘어를 적절히 설치하고 운동 축을 포함하지 않은 외부에 레이저 헤드와 진직도 반사경을 설치하고 고정시킨다. 먼저 한 축의 운동 방향에 대해 진직도 측정용 간섭계 옵틱을 설치하여 진직도 측정을 수행한 후 간섭계를 옮겨 나머지 축의 운동 방향에 대해에 대한 진직도 측정을 수행한다.

이렇게 얻어진 진직도 측정 데이터는 Fig. 1 과 같은 절차에 따라 두 축에 대한 직각도를 계산한다. 먼저 X 축에 대해 수평 방향(Y 축 방향)으로 측정된 진직도 데이터(r_{yx})는 측정 시 측정좌표계의 설정 및 광학 스퀘어 설치에 따른 아베 옵셋에 의해 측정 오차를 포함하게 되므로 아베 오차의 제거 과정이 요구된다. 다음으로 아베 오차가 제거된 진직도 데이터(m_{yx})에 대한 대표 직선을 설정하고 측정좌표계 상에서 이 대표 직선의 기울기(α)를 구한 후, 동일한 방법으로 구한 Y 축에 대해서도 측정을 수행하여 대표 직선 기울기(β)를 구한다. 이렇게 구해진 두 축에 대한 대표 직선 기울기의 관계로부터 최종적으로 두 축에 대한 직각도(s_{xy})를 구하게 된다.

2.2 광학 스퀘어 설치에 따른 아베 오차

직각도 측정 시 두 번의 진직도 오차 측정에서 간섭계 위치가 각각 기준좌표계 원점에 일치하도록 설치하면 아베 옵셋의 영향을 받지 않는다. 그러나, 공작기계 내부에 광학계 고정을 위한 설치 공간을 확보하기 어려운 문제점으로 인해 아베 오차의 제거 문제는 정밀 계측에 있어 항상 중요한 측정 오차의 결정 요인이 된다. 이러한 문제는 레이저 간섭계와 광학 스퀘어를 이용한 직각도 측정에서는 측정좌표계 설정에 따른 문제로 국한하지 않는다. Fig. 2 와 같이 광학스퀘어 설치에 따른 아베 옵셋은 필연적으로 발생하게 되며 공작기계의 기준좌표계(Reference coordinate system, RCS) 위치에 따라 항상 2 개 이상의 아베 옵셋 요소를 가지게 된다. 여기서 a_{ij} 는 기준좌표계에 대해 j 축 좌표계의 i 방향 아베 옵셋을 의미한다.

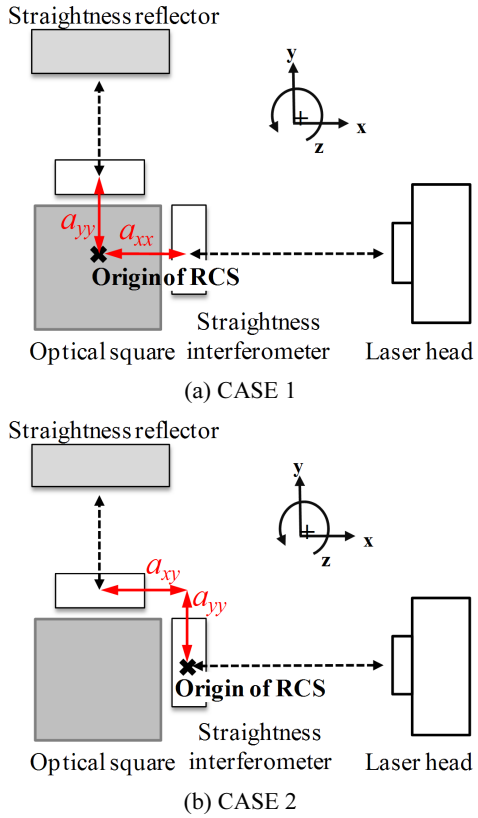


Fig. 2 Abbe's offset caused by optical square

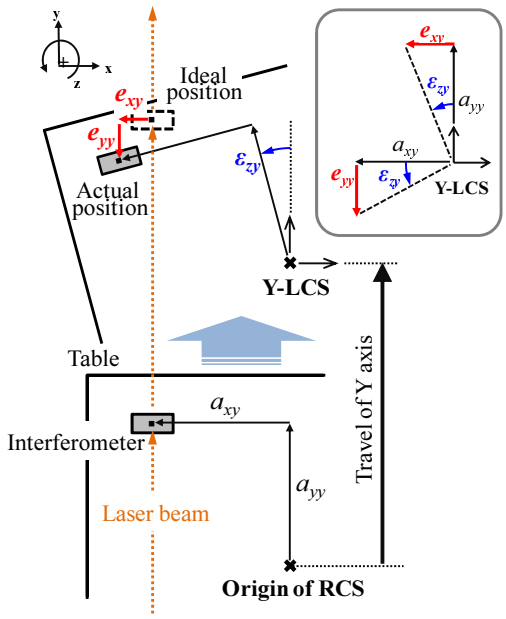


Fig. 3 Abbe's error due to positioning of interferometer

이러한 옵셋은 축 운동 시 발생하는 기하학적 오차 측정에 영향을 미친다. 만약 기준 좌표계에 대해 Fig. 2 의 (b)와 같이 측정시스템을 구성한 경우, Fig. 3 에서와 같이 Y 축의 X, Y 방향에 대한 2 개의 아베 옵셋(a_{xy}, a_{yy})은 Z 축에 대한 각도 오차(ε_{zy})에 의해 아베 오차(e_{xy}, e_{yy})를 발생시키고, 이 오차들은 수평 방향 진직도 오차(δ_{xy})와 직선 변위 오차(δ_{yy})의 측정 오차로 각각 포함된다.

3 차원 공간으로 일반화하면 궁극적으로 한 축에 대한 위치 오차 측정 시, 세 방향의 아베 옵셋은 이송 축이 가지는 세 방향에 대한 각도오차에 의해 3 개의 아베 오차를 발생시킨다고 말할 수 있다. 즉, 기준좌표계에 대해 j 축의 아베 옵셋($\mathbf{a}_j$)과 이송 축의 각도 오차($\mathbf{E}_j$)를 식 (1)과 식(2)와 같이 표현하였을 경우 아베 오차 $\mathbf{e}_j = [e_{xj} \quad e_{yj} \quad e_{zj}]^T$는 식 (3)과 같이 계산된다.

$$\mathbf{a}_j = [a_{xj} \quad a_{yj} \quad a_{zj}]^T \tag{1}$$

$$\mathbf{E}_j = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_{zj} & \varepsilon_{yj} \\ \varepsilon_{zj} & 1 & -\varepsilon_{xj} \\ -\varepsilon_{yj} & \varepsilon_{xj} & 1 \end{bmatrix} \tag{2}$$

$$\mathbf{e}_j = (\mathbf{E}_j - \mathbf{I})\mathbf{a}_j \tag{3}$$

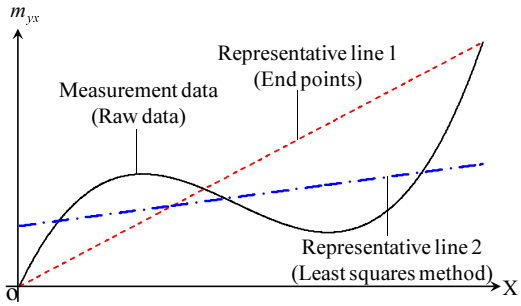
j 축에 대한 위치 측정 데이터 $\mathbf{r}_j = [r_{xj} \quad r_{yj} \quad r_{zj}]^T$에서 아베 오차를 제거하면 식 (4)와 같이 나타나며 이러한 결과는 기준좌표계에서 수행한 측정과 같은 효과를 나타낸다.

$$\mathbf{m}_j = \mathbf{r}_j - \mathbf{e}_j \tag{4}$$

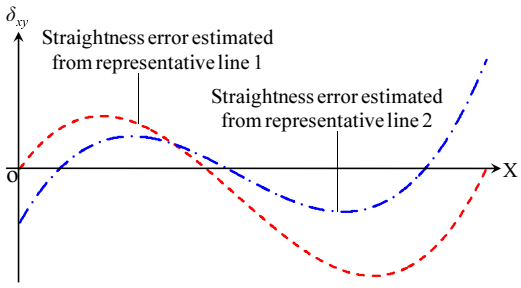
2.3 대표 직선 설정 및 직각도 계산

두 축에 대한 직각도를 계산하기 위해서는 각 이송축에 대해 아베 오차가 제거된 진직도 데이터로부터 대표 직선을 설정하는 것이 필요하다. ISO230-1 에서는 대표 직선 설정을 위한 정의 방법으로 두 가지를 소개하고 있는데, Fig. 4(a)와 같이 양 끝점 근처의 두 점을 잇는 직선(Two points, TP)으로 나타내는 방법과 최소자승법(Least square method, LS)을 이용해 직선을 구하는 방법이다.

두 점을 연결하는 방법의 예는 시작점(x_0, $m(x_0)$)과 마지막점(x_n, $m(x_n)$)을 잇는 식 (5)와 같은 직선



(a) Representative line of measurement data



(b) Straightness error estimation

Fig. 4 Straightness error estimation using representative lines

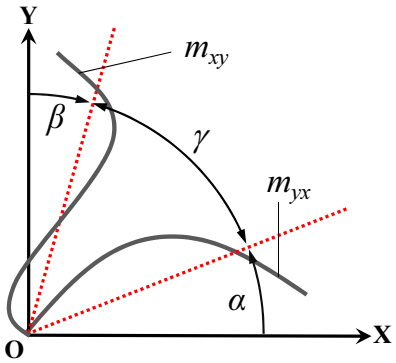


Fig. 5 Squareness and representative lines in X & Y axes

을 대표 직선으로 설정하는 방법이다. 반면 최소자승법을 이용한 방법은 식 (6)과 같이 모든 측정값에 대해 편차의 제곱합(Sum of squared error)을 최소화하는 최소자승직선으로 정의한다.

$$y_{TP} = \frac{m(x_n) - m(x_0)}{x_n - x_0} x_i \tag{5}$$

$$y_{LS} = a_0 + a_1 x_i \tag{6}$$

그 밖에 상수항이 없는 식 (7)과 같은 최소자승직선을 대표직선으로 정의하는 방법을 고려할 수도 있다. 이 방법은 좌표계 원점에서 진직도 오차가 없도록 정의할 때 유용하다.

$$y_{LS} = a_1 x_n \tag{7}$$

최종 진직도 오차는 아베 오차를 제거한 진직도 측정 데이터로부터 대표 직선 값을 제거하여 계산한 식 (8)로 얻어지며 그 결과 그래프는 Fig. 4의 (b)와 같다.

$$\begin{aligned}\delta(x_i) &= m(x_i) - y_{TP} \\ \delta(x_i) &= m(x_i) - y_{LS}\end{aligned} \tag{8}$$

한편, X, Y 두 축의 진직도 데이터에 대해 설정한 대표직선의 기울기를 각각 α, β 라고 했을 때, 직각도(s_{xy})는 식 (9)와 같이 각 축의 대표 직선의 기울기의 합으로 계산된다. 여기서 음의 직각도는 90°보다 작아지는 방향을, 양의 직각도는 커지는 방향을 의미하며 γ 는 두 대표 직선이 이루는 각도를 나타내고 최소자승법으로 정의된 두 대표 직선 사이의 관계는 Fig. 5 에 나타냈다.

$$s_{xy} = 90^\circ - \gamma = -(\alpha + \beta) \tag{9}$$

3. 전체 영역에 대한 직각도 추정

3.1 측정 범위의 문제점

일반적으로 기하학적 오차를 측정하고 보정하는 작업은 전체 이송 영역에 대해 이루어진다. 따라서 두 축간의 직각도 또한 전체 영역에 대해 측정된 두 개의 진직도 데이터로부터 계산되어야만 한다. 그렇지만 공작기계 내부에 레이저 간섭계를 이용한 직각도 측정은 광학 스퀘어를 비롯한 간섭계, 반사경 등 측정에 필요한 광학계들의 설치 공간을 확보하는 것이 매우 까다롭다. 레이저 빔의 이동이 방해를 받지 않도록 공작기계 도어 및 외부 커버 등의 장애물을 제거하여야 하며, 특히 두 축의 전체 영역에 대한 측정이 가능한 위치에 광학 스퀘어를 고정하기 위해서는 부가적인 고정물(Fixture)의 설치가 요구된다. 만약 장애물 제거 및 부가 고정물 설치 등의 선결 조건을 충족하지 못

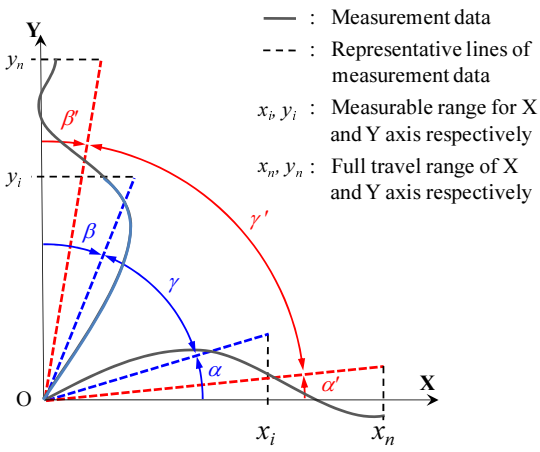


Fig. 6 Squareness of measurable and full travel range

해 국소 영역에 대해서만 측정이 이루어진다면 측정 범위의 제약은 정확한 직각도 산출에 중대한 문제를 야기시킨다. Fig. 6 과 같이 각 축에 대해 측정이 가능한 최대한의 범위를 x_i, y_i 라고 하고 해당 대표 직선의 기울기를 각각 α, β 라 했을 때 두 축간의 대표 직선이 이루는 각은 γ 가 된다. 반면 전체 범위(x_n, y_n)에 대해 구해진 대표 직선의 기울기는 α', β', 두 대표 직선이 이루는 각은 γ' 가 된다. 결국 전체 영역에 대한 직각도는 식 (9)가 아닌 식 (10)과 같이 계산된다.

$$s_{xy}' = 90^\circ - \gamma' = -(\alpha' + \beta') \tag{10}$$

만약 광학 스퀘어 설치 후 측정한 두 축의 진직도 데이터 파일들을 그대로 레이저 측정시스템 제조사에서 제공하는 상용 직각도 분석 프로그램의 입력으로 사용한다면 국소 범위에 해당하는 직각도를 결과로 출력하게 되며 이는 심할 경우 반대 부호 방향으로 오차 보정을 수행하는 문제를 야기한다. 따라서 이 절에서는 광학 스퀘어를 이용한 직각도 측정에 수반되는 장애물 제거 및 고정물 제작 등 까다로운 작업을 수행하지 않고도 국소 영역에 대한 측정데이터로부터 전체 영역에 대한 직각도를 추정할 수 있는 방법을 제안한다.

3.2 진직도 측정 데이터의 최적 맞춤

보통 광학 스퀘어의 설치 없이 독립 축에 대한 진직도 측정은 전체 영역에 대해 쉽게 수행될 수 있는데 이를 활용하여 광학 스퀘어 설치 시의 전

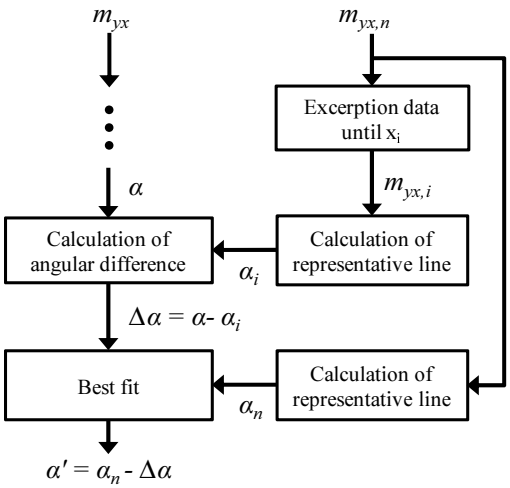
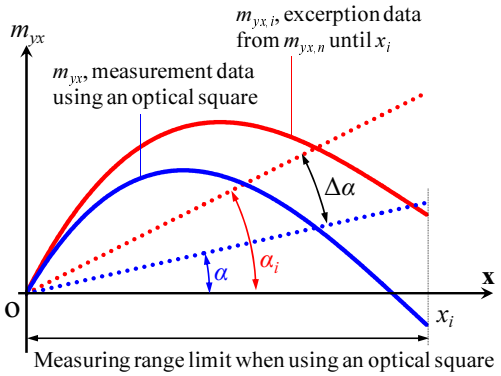
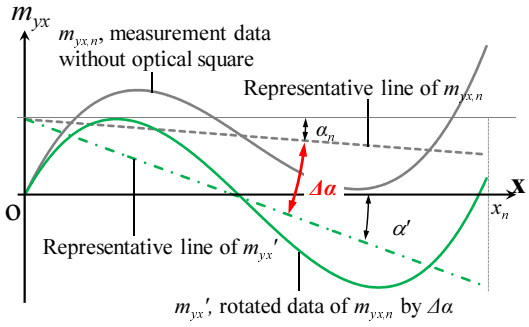


Fig. 7 Squareness analysis procedure for full range



(a) Angular difference between measurement coordinate systems of straightness measurement data (with & without optical square)



(b) Inclination of representative line of best fit data with X axis

Fig. 8 Best fit of straightness measurement data for full range when using optical square

이송 범위에 대한 진직도를 유추할 수 있다. 이론상 측정 좌표계가 동일한 자세를 유지한다면 측정 범위만 다를 뿐 광학 스퀘어의 설치 유무에 상관없이 똑같은 측정 결과값을 보여야 하기 때문에 두 측정좌표계를 일치시키는 과정을 통해 두 진직도 데이터를 일치시킬 수 있다. 즉, 광학 스퀘어를 이용하여 측정한 국소 범위의 진직도 데이터와 광학 스퀘어 없이 측정한 전체 범위의 진직도 오차 데이터간의 최적 맞춤 작업을 수행하는 방법이다.

진직도 데이터는 측정 범위에 따라 다른 대표 직선이 설정되기 때문에 전체 영역에 대한 직각도 계산을 위해서는 Fig. 1 에서의 기울기 α 대신 전체 영역에 대한 대표 직선의 기울기가 필요하다. 따라서 광학 스퀘어 없이 독립 축에 대해 측정된 전체 영역의 진직도 데이터($m_{yx,n}$)를 활용해 새로운 대표 직선의 기울기를 산출하는 Fig. 7 과 같은 절차를 삽입해야 한다. 먼저 전체 영역에 대해 측정된 진직도 데이터($m_{yx,n}$)에서 광학 스퀘어 설치 시의 측정 영역과 동일한 구간(x_i)만큼 발췌하고, 발췌한 진직도 데이터($m_{yx,i}$)로부터 대표 직선의 기울기(α_i)를 계산한 후, 두 기울기의 차이($\Delta\alpha$)만큼 전체 영역의 진직도 데이터($m_{yx,n}$)를 회전하는 방법으로 최적 맞춤하여 새로운 기울기(α')를 구한다.

Fig. 8(a)은 광학 스퀘어 설치 시 x_i 범위에 대한 진직도 데이터(m_{yx})와 광학 스퀘어 설치 없이 전체 범위에 대해 측정한 진직도 데이터($m_{yx,n}$)에서 동일한 구간만큼 발췌한 진직도($m_{yx,i}$)에 대한 대표직선 기울기를 각각 α, α_i 라고 했을 때, 두 진직도 데이터의 최적 맞춤을 위한 기울기 차이($\Delta\alpha$)는 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta\alpha = \alpha_i - \alpha \tag{11}$$

식 (11)에서 구해진 두 측정 좌표계 사이의 회전 각도 차이만큼 광학 스퀘어 없이 측정한 진직도($m_{yx,n}$)를 회전시킨다면 광학 스퀘어 설치 시의 진직도 (m_{yx})와 최소한의 오차를 가지고 서로 일치하게 되며 최종적으로 회전시킨 진직도 결과는 Fig. 8(b)의 m_{yx}' 와 같다. 즉, 변환된 진직도 오차 데이터 m_{yx}' 의 대표 직선 기울기(α')는 광학 스퀘어 미설치 시의 최소자승직선 기울기(α_n)에서 식 (11)에서의 기울기 차이($\Delta\alpha$)를 뺀 값과 같으며 식 (12)와 같다.

$$\alpha' = \alpha_n - \Delta\alpha \tag{12}$$

나머지 Y 축에 대한 계산도 동일한 방법으로 진행할 수 있으며 계산된 대표 직선의 기울기 결과는 식 (13)과 같고 최종적으로 식 (10)을 통해 전 범위에 해당하는 직각도를 구할 수 있다.

$$\beta' = \beta_n - \Delta\beta \tag{13}$$

4. 실험

앞 절에서 검토한 직각도 측정 방법을 실험적으로 확인하기 위해 Fig. 9 와 같이 3 축 공작기계에 대한 XY 평면의 직각도를 측정하였다. 실험에 사용된 측정시스템은 Renishaw 社의 레이저 간섭계 시스템(XL-80) 및 광학 스퀘어를 사용하였으며 아베 오차의 제거를 위하여 각 축의 각도 오차를 10 *mm* 간격으로 세 번의 반복, 왕복 측정하였으며, 롤 오차를 제외한 각도 오차의 측정 결과는 Fig. 10 에 나타내었다.

직각도 측정은 광학 스퀘어를 설치 후 X 축에 대한 진직도 오차를 측정한 후 간섭계를 옮겨 Y 축에 대해 진직도 오차를 측정하는 순서로 진행하였다. 공작기계의 기계 원점(Home position) 상태에서 스핀들과 근접한 위치에 광학 스퀘어를 설치하였으며 이로 인해 진직도 간섭계의 설치 공간에 제약이 발생하였다. 기계 원점에서의 기준좌표계를 기준으로 측정된 아베 옵셋은 Table 2 와 같다. 또한 광학 스퀘어의 설치로 인해 진직도 오차 측정이 가능한 최대 이송 범위는 X, Y 축 각각 200 mm 로 제한되었다. 반면 광학 스퀘어의 설치 없이 간섭계와 반사경의 설치만으로 측정한 진직도는 X 와 Y 축에 대해 각각 450 mm 와 250 mm 까지 측정하였다.

Fig. 11(a)는 X 축에 대한 아베 오차 제거 전과 후의 진직도 측정 데이터 및 대표 직선인 최소자승 직선을 나타내며, 아베 오차 제거 유무에 따라

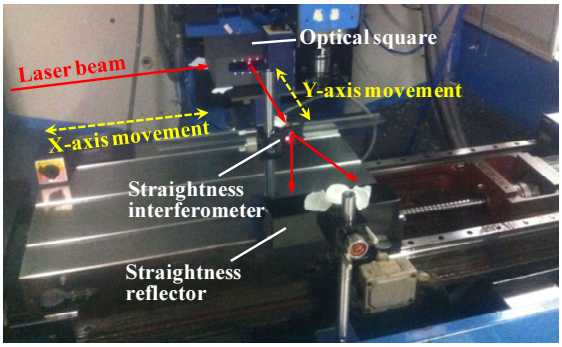


Fig. 9 Experimental setup for squareness measurement

Table 1 Specification for squareness measurement

Manufacturer	Renishaw XL-80
Range	±3/M *mm/m*
Accuracy	±0.5% ±2.5 ±0.8M *μm/m*
Resolution	0.01 *μm/m*

M = measurement distance in metres of the longest axis
% = percentage of displayed value

Table 2 Abbe's offset

	$a_{xj}(mm)$	$a_{yj}(mm)$	$a_{zj}(mm)$
x-axis	-530	60	-35
y-axis	0	-305	-32

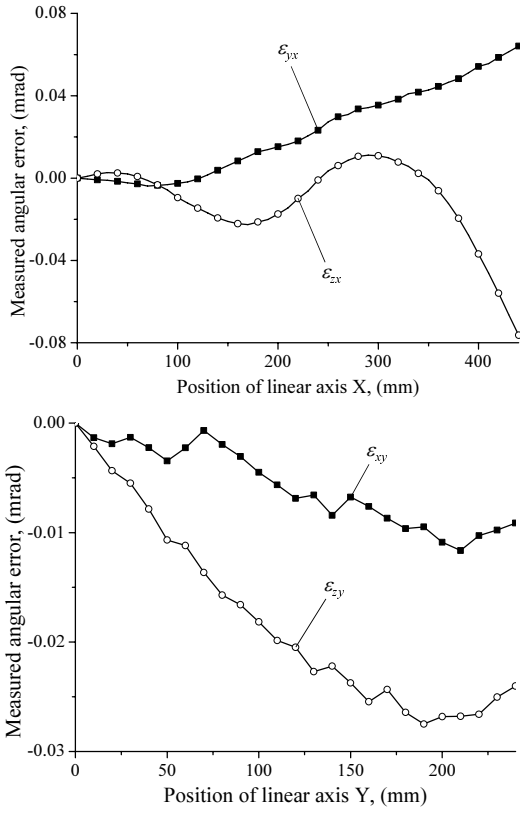
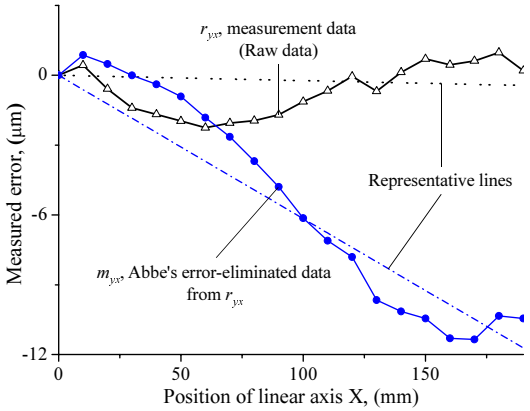
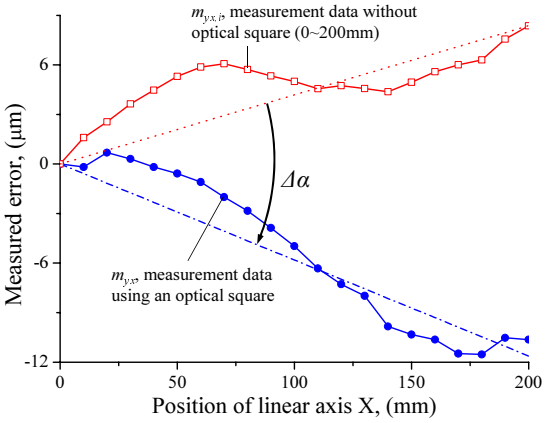


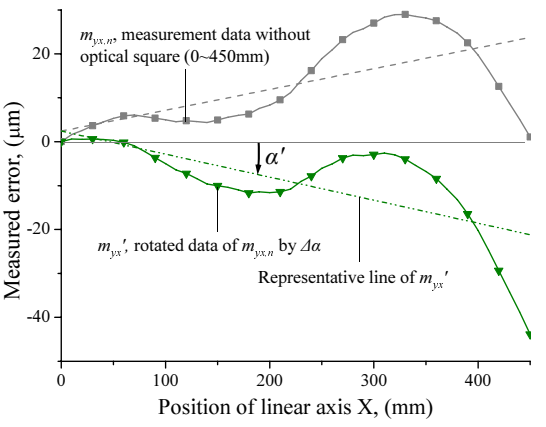
Fig. 10 Angular error measurements of X and Y axes



(a) Elimination of Abbe's error from measurement data

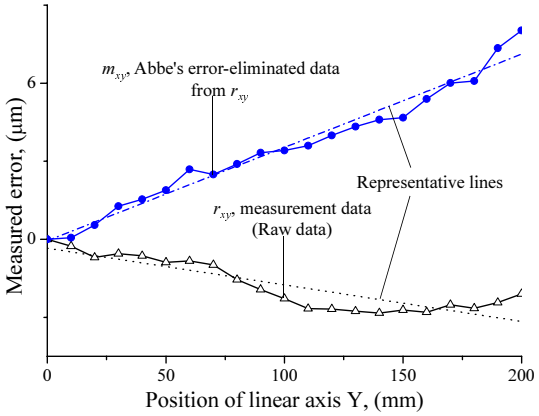


(b) Angular difference between measurement coordinate systems (with & without optical square)

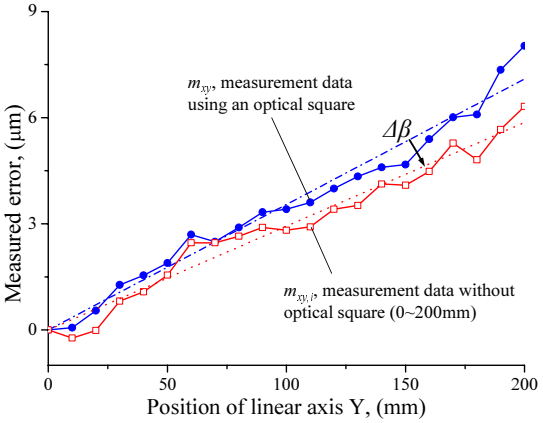


(c) Best fit of straightness data for full range

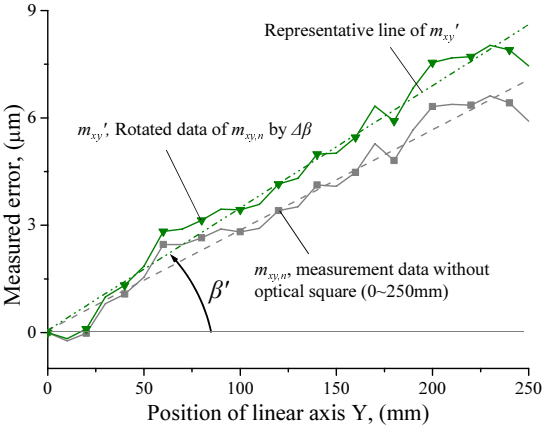
Fig. 11 Abbe's error elimination and Best fit of straightness measurement data for X axis



(a) Elimination of Abbe's error from measurement data



(b) Angular difference between measurement coordinate systems (with & without optical square)



(c) Best fit of straightness data for full range

Fig. 12 Abbe's error elimination and Best fit of straightness measurement data for Y axis

Table 3 Results of squareness analysis

CASE	Measurement range(*mm*)	Squareness (*μm/m*)
(a)	x:0~200, y:0~200	4.08
(b)	x:0~200, y:0~200	39.21
(c)	x:0~450, y:0~250	18.41

(a) Before elimination of Abbe's error
(b) After elimination of Abbe's error
(c) Analysis for full travel range with the proposed method

대표 직선의 기울기가 큰 차이를 보이고 있다. 전체 범위에 해당하는 진직도 데이터를 얻기 위해 광학 스퀘어 없이 측정된 전 영역의 진직도 데이터의 최적 맞춤을 실행하였으며 Fig. 11(b)에서 볼 수 있듯 광학 스퀘어 없이 측정한 데이터에서 국소 범위인 200 *mm* 구간에 해당하는 데이터를 발췌한 뒤 각도 차이를 계산하였다. 이 때, 광학 스퀘어 없이 측정한 데이터를 각도 차이 $\Delta\alpha$ 만큼 회전하였을 경우 두 데이터 간의 R^2 가 98.55%로 타당한 값을 나타내었다.

마지막으로, 계산된 각도 차이($\Delta\alpha$)만큼 광학 스퀘어 없이 측정한 데이터를 회전시킨 후 대표 직선의 기울기(α')를 구하였다. 동일한 절차로 Y 축에 대한 진직도 오차 측정에도 적용하였으며 Fig. 12 에 차례대로 나타내었다. 아베 오차 제거 작업 및 전체 영역에 대한 진직도 추정 작업을 통해 구해진 직각도는 최종적으로 Table 3 에 나타내었다.

아베 오차 제거 전 원 측정 데이터를 입력으로 하여 계산한 직각도와 아베 오차 제거 후의 데이터를 입력으로 한 직각도의 차이는 약 35.13 *μm/m* 로써 크게 나타났다. 또한 최적 맞춤을 통해 구해진 전체 영역의 결과값은 18.41 *μm/m* 로 국소 영역에서 측정된 직각도와 큰 차이를 보였다. 이러한 결과의 차이는 오차 보정을 수행할 때 국소 영역의 측정만으로 계산한 직각도를 전체 영역의 보정에 사용되지 않도록 주의해야 한다는 것을 의미한다. 이러한 주의는 직각 마스터를 사용하거나 볼바를 사용하여 구한 직각도 결과에도 동일하게 요구된다.

5. 결론

본 논문에서는 레이저 간섭계를 사용한 직각도 측정 방법에 대해 살펴보고 측정 오차와 측정 범위의 문제점 개선을 위한 분석 방법들을 제시하였으며 결론은 아래와 같다.

- 광학 스퀘어의 구조 및 설치 공간 제약으로 인해 필연적으로 발생하는 아베 오차를 제거하는 방법을 제시하였다.
- 광학 스퀘어의 설치에 따른 국소 범위의 진직도 측정 데이터와 광학 스퀘어 없이 측정한 진직도 데이터의 최적 맞춤을 통해 전체 이송 영역에 대한 직각도 추정 방법을 제안하였다.

후 기

이 논문은 2012 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 대학중점연구소지원사업으로 수행된 연구임(No. 2012-0005856).

참고문헌

1. Kwon, S. R., Kweon, S. H., and Yang, S. H., "Measurement of Geometric Errors of an Ultra Precision mMT using PSDs," Trans. of the KSME A, Vol. 35, No. 1, pp. 53-58, 2011.
2. Lee, K. I., Lee, D. M., Kweon, S. H., and Yang, S. H., "Geometric Error Estimation of a Rotary Table using Double Ball-bar," Journal of the KSPE, Vol. 27, No. 11, pp. 98-105, 2010.
3. Lee, J. H. and Yang, S. H., "Measurement of Geometric Errors in a Miniaturized Machine Tool using Capacitance Sensors," Journal of Materials Proce-ssing Technology, Vol. 164-165, pp. 1402-1409, 2005.
4. Schwenke, H., Knapp, W., Haitjema, H., Weckenmann, A., Rchmitt, R., and Delbressine, F., "Geometric Error Measurement and Compensation of Machines-an Update," CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 57, No. 2, pp. 660-675, 2008.
5. Kim, K. H. and Yang, S. H., "A Reverse Kinematic Approach for Error Analysis of a Machine Tool using Helical Ball Bar Test," Journal of the KSPE, Vol. 18, No. 3, pp. 143-151, 2001.
6. ISO 230-1, "Test code for machine tools-Part 1: Geometric accuracy of machines operating under no-load or finishing conditions," 1996.
7. Lee, C. W., Song, J. Y., and Ha, T. H., "Measurement of Axis Squareness by using Reversal Method," Proc.

of KSPE Autumn Conference, pp. 436-439, 2005.
8. Hai, N., Yuan, J., and Ni, J., “Reverse Kinematic Analysis of Machine Tool Error using Telescoping Ball Bar,” ASME, PED 68-1, pp. 277-286, 1994.
9. Lee, J. H., Liu, Y., and Yang, S. H., “Accuracy Improvement of Miniaturized Machine tool : Geometric Error Modeling and Compensation,” International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 46, No. 12-13, pp. 1508-1516, 2006.
10. Chen, G., Yuan, J., and Ni, J., “A Displacement Measurement Approach for Machine Geometric Error Assessment,” International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 41, No. 1, pp. 149-161, 2001.
11. Castro, H. F. F. and Burdekin, M., “Dynamic Calibration of the Positioning accuracy of Machine Tools and Coordinate Measuring Machine using a Laser Inter-ferometer,” International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 43, No. 9, pp. 947-954, 2003.
12. Hewlett Packard, “HP - Agilent 5529A Dynamic Calibrator : Verify Machine Performance with the World Standard for Laser-Based Metrology,” 2005.
13. Renishaw plc, “XL-80 Laser System : Portable Laser Measurement and Calibration,” 2007.
14. Steinmetz, G. R., “Sub-micron Position Measurement and Control on Precision Machine Tools with Laser Interferometry,” Precision Engineering, Vol. 12, No. 1, pp. 12-24, 1990.
15. Renishaw plc, “Renishaw Laser Interferometer System Manual Ver. 2.1, Linear Measurement,” pp. 38-43, 2009.
16. Renishaw plc, “Renishaw Laser Interferometer System Manual Ver. 2.1, Squareness Measurement,” pp. 5-21, 2009.