

볼바를 사용한 회전 테이블의 기하학적 오차 평가

Estimation of Geometric Errors for a Rotary Table with Double Ball-bar Measurements

*이광일¹, 이동목¹, #양승한²

*K. I. LEE¹, D. M. LEE¹, #S. H. YANG(syang@knu.ac.kr)²

¹경북대학교 대학원 기계공학과, ²경북대학교 기계공학부

Key words : 5-axis machine tool, Geometric errors, Rotary table, Double ball-bar, Least squares

1. 서론

일반적으로 3 개의 직선 이송축(prismatic axes)과 2 개의 회전 테이블(rotary tables)로 구성되는 5 축 공작기계는 공구와 공작물 사이의 위치(position)와 방향(orientation)을 유연하게 결정할 수 있으며, 복잡한 형상의 부품을 효율적으로 가공할 수 있다. 그러나 이송축에는 물리적 불완전성에 의하여 필연적으로 기하학적 오차(geometric errors)가 있으며, 이는 정확한 위치 및 방향 결정에 큰 문제점을 야기시키고 최종 가공물의 품질에 악영향을 미친다.

이송축의 기하학적 오차를 측정하기 위하여 레이저 간섭계, PSD 등 여러 가지 방법이 사용되고 있으나, 산업현장에서 요구하는 간소한 측정과 짧은 측정시간을 충족시키는 볼바(double ball-bar) 측정이 널리 사용된다. 볼바 측정은 원호 경로(circular path)를 추종하는 공작물 볼(WB)과 고정된 톨 볼(TB) 사이의 길이 변화를 사용하여 해당 이송축의 기하학적 오차를 평가하는 방법이며,¹ 초기 공작기계에서 사용된 원판 가공 기반의 이송계 평가 방법을 대체하기 위하여 개발되었다.² 직선 3 축 공작기계의 이송계를 평가하기 위하여 오차 합성 모델기반의 볼바 측정 방법이 제안되었으며,³ 5 축 공작기계에서 회전테이블의 기하학적 오차를 측정하기 위한 방안이 제시되었으나 평가하고자 하는 회전테이블의 회전축과 볼바를 정확하게 일치시켜야 하는 문제점을 나타낸다.⁴

본 논문에서는 5 축 공작기계의 구성 요소인 회전테이블의 5 개 기하학적 오차(3 개의 위치오차와 2 개의 회전오차)를 평가하기 위하여, 회전테이블의 오차 모델을 정의하고 볼바 측정 기반의 오차 추정 방법을 제안하였다. 최종적으로 모의실험을 통하여 제안된 방법의 타당성을 검증하였다.

2. 회전테이블의 오차 평가

공간상에 위치하는 회전테이블에는 Fig. 1 에 나타난 바와 같이 회전각 θ 에 종속적인 3 개의 위치오차($\delta_x(\theta)$, $\delta_y(\theta)$, $\delta_z(\theta)$)와 3 개의 회전오차($\epsilon_x(\theta)$, $\epsilon_y(\theta)$, $\epsilon_z(\theta)$)가 있다. 이러한 오차의 영향에 의하여 회전테이블의 왜곡된 자세 \mathbf{H} 는 4x4 균일변환행렬에 의하여 식 (1)과 같이 주어진다. 여기서 6 개의 오차는 동일한 기준에서의 평가를 위해 절대좌표계에 대하여 정의한다.

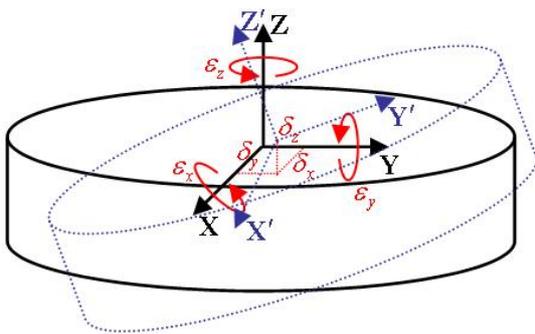


Fig. 1 Geometric errors for a rotary table

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & -\epsilon_z & \epsilon_y & \delta_x \\ \epsilon_z & 1 & -\epsilon_x & \delta_y \\ -\epsilon_y & \epsilon_x & 1 & \delta_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

2.1. 위치오차 $\delta_z(\theta)$

회전테이블의 위치 오차 $\delta_z(\theta)$ 를 추정하기 위하여 볼바를 Fig. 2 와 같이 위치시키는 경우 WB, TB 의 좌표는 식 (2)와 같이 주어지고, 볼바의 측정데이터 $R + \Delta R$ 는 식 (3)과 같이 결정된다.

$$\mathbf{WB} = \mathbf{H} \begin{bmatrix} x_m & y_m & z_m & 1 \end{bmatrix}^T \quad (2)$$

$$\mathbf{TB} = \begin{bmatrix} x_c & y_c & R + z_c & 1 \end{bmatrix}^T$$

$$\Delta R = -(z_m + \delta_z - z_c) \quad (3)$$

여기서 (x_m, y_m, z_m) , (x_c, y_c, z_c) 는 볼바 설치시 발생하는 오차를 나타낸다.

2.2 위치오차 $\delta_x(\theta)$, $\delta_y(\theta)$ 와 회전오차 $\epsilon_x(\theta)$, $\epsilon_y(\theta)$

볼바를 Fig. 3 에 나타난 바와 같이 회전테이블에 설치하는 경우 WB, TB 의 좌표와 볼바 측정데이터 $R + \Delta R$ 는 각각 식 (4)와 식(5)와 같이 주어진다.

$$\mathbf{WB} = \mathbf{H} \begin{bmatrix} R + x_m & y_m & L + z_m & 1 \end{bmatrix}^T \quad (4)$$

$$\mathbf{TB} = \begin{bmatrix} x_c & y_c & L + z_c & 1 \end{bmatrix}^T$$

$$\Delta R = -\epsilon_x L \sin\theta + \epsilon_y L \cos\theta + (\delta_x - x_c) \cos\theta + (\delta_y - y_c) \sin\theta + x_m \quad (5)$$

여기서 L 은 볼바 측정시 사용되는 고정치구의 높이를 나타낸다.

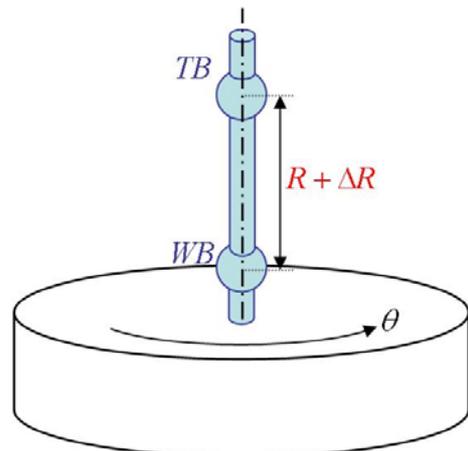


Fig. 2 Ball-bar set-up for $\delta_z(\theta)$ of rotary table

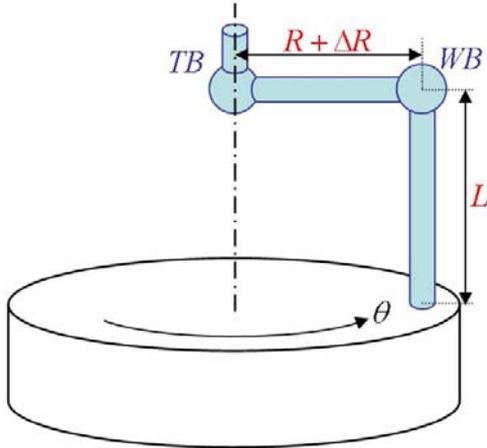


Fig. 3 Ball-bar set-up for $\delta_x(\theta)$, $\delta_y(\theta)$, $\epsilon_x(\theta)$, $\epsilon_y(\theta)$ of rotary table

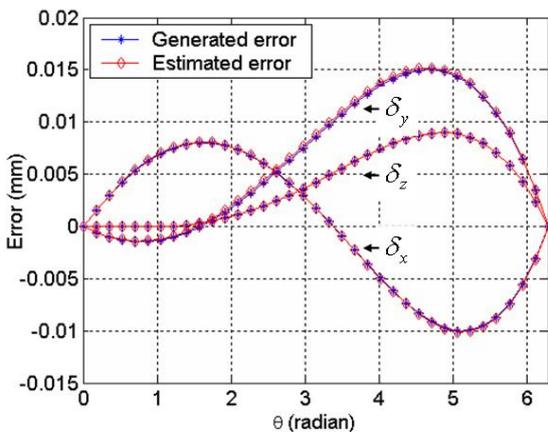


Fig. 4 Generated errors and estimated errors for position

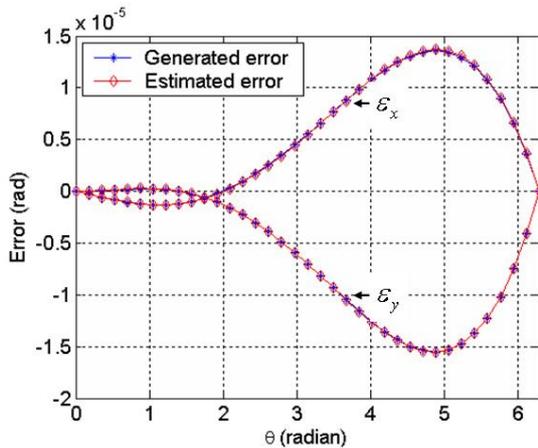


Fig. 5 Generated errors and estimated errors for rotation

2.3 최소자승을 사용한 오차 추정

볼바 측정데이터와 회전테이블의 오차 관계를 나타내는 식 (3)과 (5)에서 오차를 추정하기 위하여, 각각의 오차를 4 차 다항식으로 정의하고 최소자승을 사용하여 다항식의 계수를 결정한다. 이송축의 원점에서 모든 오차는 0 으로 정의하며, 이러한 경우 회전테이블의 오차를 나타내는 4 차 다항식 f 의 형태는 식 (6)과 같이 주어진다. 여기서 (a_1, a_2, a_3)는 다항식의 계수를 나타내며, 5 개의 오차를 추정하기 위해서는 15 개의 다항식 계수를 결정하여야 한다.

$$f = \theta(\theta - 2\pi)(a_1\theta^2 + a_2\theta + a_3) \tag{6}$$

Table 1 Maximum values of generated error, estimation error for rotary table (unit: mm, rad)

	Generated error	Estimation error
δ_x	0.020	1.2456×10^{-4}
δ_y	0.015	1.4485×10^{-4}
δ_z	0.019	1.2736×10^{-6}
ϵ_x	1.3575×10^{-4}	1.2716×10^{-7}
ϵ_y	1.5514×10^{-4}	5.4710×10^{-8}
ϵ_z	1.2605×10^{-4}	-

따라서 식 (6)을 사용하여 식 (3)과 (5)를 재정의하는 경우 식 (7)과 같이 주어진다.

$$Y = AX \tag{7}$$

여기서 X, Y 는 각각 4 차 다항식의 계수와 측정데이터 ΔR 로 구성된 열벡터(column vector)이며, A 는 회전각 θ 로 구성된 행렬이다.

3. 오차 추정 모의 실험

제안된 오차 추정 알고리즘의 타당성을 검증하기 위하여 기하학적 오차를 생성하였으며, 식 (3)을 사용하여 $\delta_x(\theta)$ 를 추정하였다. 또한 식 (5)의 L 을 0 으로 두고 $\delta_x(\theta), \delta_y(\theta)$ 을 추정하고 L 을 100 mm로 두고 $\epsilon_x(\theta), \epsilon_y(\theta)$ 을 평가하였다. 이러한 경우 생성된 기하학적 오차와 추정된 오차는 Fig. 4 와 Fig. 5 에 나타내었으며, 생성된 오차와 추정 오차의 최대값은 Table 1 에 정리하였다.

4. 결론

회전 테이블의 3 개의 위치오차와 2 개의 회전오차를 평가하기 위하여 볼바 기반의 측정 방법을 제안하였으며, 모의 실험을 통하여 제안된 방법의 타당성을 검증하였다. 회전테이블의 기하학적 오차와 볼바 측정데이터의 관계를 정의하였으며, 최소자승을 사용하여 4 차 다항식으로 근사화된 오차를 추정하였다.

후기

이 논문은 정부의 재원으로 한국과학재단의 지원(2008년도 국가지정연구실사업)을 받아 수행된 연구임(No. R0A-2007-000-10045-0).

참고문헌

1. Yang, S.H., Kim, K.H., Park, Y.K., and Lee, S.G., "Error Analysis and Compensation for the Volumetric Errors of a Vertical Machining Centre using a Hemispherical Helix Ball Bar Test," Int. J. Adv. Manu. Tech., 23, 495-500, 2004.
2. Kakino, Y., Ihara, Y., and Nakatsu, Y., "The Measurement of Motion Errors of NC Machine Tools and Diagnosis of their Origins by using Telescoping Magnetic Ball Bar Method," Annals of the CIRP, 36, 377-380, 1987.
3. Hai, N., Yuan, J., and Ni, J., "Reverse Kinematic Analysis of Machine Tool Error using Telescoping Ball Bar," ASME, PED 68-1, 277-286, 1994.
4. Zargarbashi, S.H.H., Mayer, J.R.R., "Assessment of Machine Tool Trunnion Axis Motion Error, using Magnetic Double Ball Bar," Int. J. Mach. T. Manu., 46, 1823-1834, 2006.