

5 축 공작기계의 직선축과 회전축 간의 기하학적 오차 평가 방법 Estimation of Position Independent Geometric Error Parameters between a Linear and a Rotary Axis in a 5-axis Machine Tool

*이동목¹, 이광일¹, 이재창¹, #양승한¹

*D. M. LEE¹, K. I. LEE¹, J. C. LEE¹, #S. H. YANG(syang@knu.ac.kr)¹
¹ 경북대학교 기계공학부

Key words : 5-axis machine tool, Position independent geometric error parameters, Offset, Double ball-bar

1. 서론

일반적으로 5 축 공작기계는 3 개의 직선축과 2 개의 회전축으로 구성되며 복잡한 곡면이나 형상의 효율적인 가공이 가능하다. 그러나 여러 오차 요인들에 의하여 5 축 공작기계에는 공구와 공작물 간의 상대적인 자세 결정에 문제가 나타나며 제품의 품질을 저하시킨다. 이러한 오차 요인들 중에는 기하학적 오차가 가장 큰 비중을 차지하며 기하학적 오차는 구동량에 종속적인 위치종속오차변수(position dependent geometric error parameters; PDGEPs)와 구동량에 독립적인 위치독립오차변수(position independent geometric error parameters; PIGEPs)로 구분된다.¹ PDGEPs는 3 개의 위치 오차(1 displacement, 2 straightness)와 3 개의 회전 오차(roll, pitch, yaw)로 구성되며 PIGEPs는 직각도(squareness)와 오프셋(offset)으로 정의된다. 일반적으로 직선축 간에는 직각도만을 고려하지만 직선축과 회전축 간에는 오프셋을 추가적으로 고려해야 한다.^{1,2} 직선축 간의 직각도 측정과 관련하여 많은 연구가 진행되었으며, 이와 관련하여 표준화가 이루어지고 있다.³ 그러나 직선축과 회전축 간의 PIGEPs 측정에 관한 연구는 미흡한 실정이며 볼바(ball-bar)를 사용한 PIGEPs를 측정 방법이 제안되었으나 구동축의 PDGEPs를 고려하지 않는 문제점을 가진다.^{2,4}

본 논문에서는 직선축과 회전축의 PDGEPs를 고려하여 오프셋을 측정하는 방법을 제안한다. 1 개의 직선축과 1 개의 회전축만을 사용하여 볼바 원호 경로(circular path)를 생성하며 두 축만을 사용함으로써 오차 측정 과정을 간소화하여 데이터의 신뢰성을 확보한다. 제안된 오차 측정 방법의 타당성은 모의 실험을 통해 검증한다.

2. 직선축과 회전축 간의 오프셋 측정

2.1 직선축과 회전축의 기하학적 오차

직선축과 회전축에는 각각 6 개의 PDGEPs가 있으며 이는 3 개의 위치 오차($\delta_{xi}, \delta_{yi}, \delta_{zi}$)와 3 개의 회전 오차($\epsilon_{xi}, \epsilon_{yi}, \epsilon_{zi}$)로 나타낸다. 여기서 i 는 해당 구동축을 의미한다.⁵ 직선축 Y의 좌표계 {Y}와 회전축 C의 좌표계 {C} 간의 PIGEPs는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 2 개의 오프셋(o_{xc}, o_{yc})와 2 개의 직각도(s_{xc}, s_{yc})로 정의한다. 여기서 좌표계 {C}는 기준좌표계인 {Y}를 기준으로 결정한다.

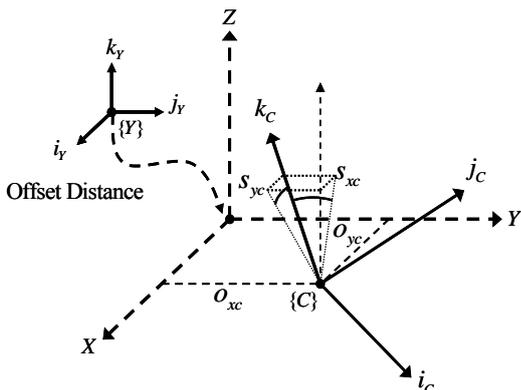


Fig. 1 PIGEPs between a linear axis and a rotary axis

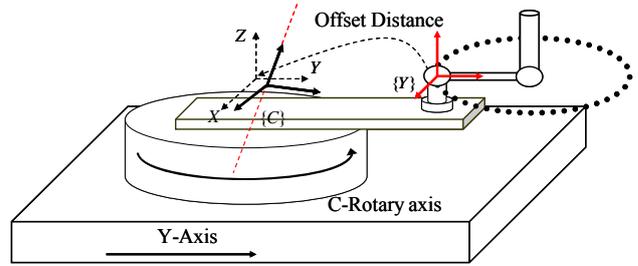


Fig. 2 Configuration of ball-bar measurement for offset

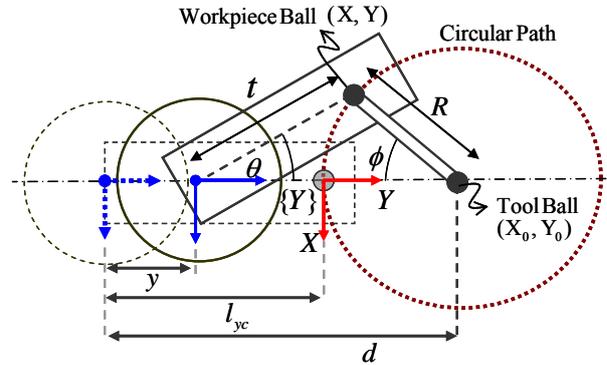


Fig. 3 Circular path generation using Y-axis, C-axis

2.2 직선축과 회전축 간의 오프셋 측정

직선축과 회전축 간의 오프셋을 측정하는 경우 볼바는 Fig. 2와 같이 위치한다. 볼바 측정에서 툴 볼(tool ball; TB)은 스피indle에 고정되어 있으며 공작물 볼(workpiece ball; WB)은 공작물 베드에 고정된다. 여기서 WB는 직선축과 회전축에 의하여 생성된 원호 경로를 따라 움직인다. 이러한 경우 볼바의 측정데이터는 원호 경로의 반경 방향의 거리 $R + \Delta R$ 을 나타낸다. 구동축 간의 기하학적 관계와 측정데이터를 사용하는 경우 볼바 방정식은 식 (1)과 같다. 여기서 (X, Y) , (X_0, Y_0) 는 이상적인 WB와 TB의 좌표이며, $(\Delta X, \Delta Y)$, $(\Delta X_0, \Delta Y_0)$ 는 기하학적 오차에 의하여 왜곡된 WB와 TB의 좌표와 이상적인 좌표간의 위치 오차이다.

$$RAR = (X - X_0)(\Delta X - \Delta X_0) + (Y - Y_0)(\Delta Y - \Delta Y_0) \quad (1)$$

직선축과 회전축을 사용하여 생성된 원호 경로는 Fig. 2에 나타내었으며, 원호 경로 변수(θ, y)는 식 (2)와 같이 주어진다.

$$\theta = \sin(-R \sin \phi / t)^{-1} \quad (2)$$

$$y = d - t \cos \theta - R \cos \phi$$

측정 시 고정된 TB의 좌표와 원호 경로를 추종하는 이상적인 WB의 좌표는 식 (3)과 같이 정의되며 Fig. 3에 나타내었다. 여기서 d 는 초기 {C}의 원점과 TB의 거리이며, t 는 {C}의 원점과 WB의 거리를 의미한다. 또한 y 는 직선

이송축의 변위, R 은 볼바의 길이를 나타낸다. θ, ϕ 는 C 의 회전각과 원호 경로의 파라메트릭 변수를 표현한다.

$$\begin{aligned}
 TB &= [X_0 \ Y_0 \ 0 \ 1]^T \\
 WB &= [X \ Y \ 0 \ 1]^T \\
 &= [-t \sin \theta \ -l_{yc} + y + \cos \theta (l_{yc} - Y_0) + R \ 0 \ 1]^T
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

식 (1)에 식 (3)과 왜곡된 TB, WB의 좌표를 대입하는 경우 볼바 측정데이터와 오프셋의 관계는 식 (4)와 같이 정의된다.

$$\begin{aligned}
 R\Delta R &= A_1 o_{xc} + A_2 o_{yc} + H \\
 A_1 &= X(1 - \cos \theta) - \sin \theta (Y - Y_0) \\
 A_2 &= X \sin \theta - (Y - Y_0)(1 - \cos \theta) \\
 H &= \left\{ \begin{aligned} &\delta_{xc} + \delta_{xy} + \varepsilon_{xy} l_{yc} - \delta_{yy} (Y_0) \sin \theta + \\ &\cos \theta (-\varepsilon_{xy} l_{yc} + \varepsilon_{xc} Y_0 + \varepsilon_{xy} Y_0 - \varepsilon_{xc} l_{yc} + \delta_{xy} (Y_0)) \end{aligned} \right\} X \\
 &+ \left\{ \begin{aligned} &\delta_{yc} + \delta_{yy} + \delta_{yy} (Y_0) \cos \theta - \\ &\sin \theta (\varepsilon_{xy} l_{yc} + \varepsilon_{xc} Y_0 + \varepsilon_{xy} Y_0 + \delta_{xy} (Y_0) - \varepsilon_{xc} l_{yc}) \end{aligned} \right\} (Y - Y_0)
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

식 (4)는 오프셋을 미지수로 하는 선형방정식인 식 (5)의 형태로 재정의되며, 최소자승법을 통하여 오프셋을 결정한다.

$$\mathbf{AX} = \mathbf{B}
 \tag{5}$$

여기서 \mathbf{A} 는 오프셋의 계수 A_1, A_2 로 구성된 행렬이며 \mathbf{X} 는 2개의 미지수 값인 오프셋으로 구성된 열벡터(column vector)이다. 그리고 \mathbf{B} 는 볼바의 측정데이터와 직선축과 회전축의 PDGEPs로 구성된 열벡터를 나타낸다.

3. 모의 실험

제안된 측정 방법의 타당성을 나타내기 위하여 직선축과 회전축의 PDGEPs는 삼각함수모델(trigonometric model)을 사용하여 Fig. 4와 같이 생성하였으며, PIGEPs는 Table 1의 값을 사용하여 볼바 측정데이터를 계산하였다. 이러한 경우 기하학적 오차에 의하여 측정데이터는 Fig. 5와 같이 왜곡된 형태를 나타내었다. 볼바의 측정데이터와 식 (5)를 사용하여 추정된 오프셋은 Table 2에 정리하였다.

Table 1 Simulation parameters

Machine tool parameter		Assumed geometric error	
l_{yc}	370 mm	S_{xc}	37 arcsec
t	220 mm	S_{yc}	47 arcsec
R	150 mm	O_{xc}	12 μ m
d	370 mm	O_{yc}	23 μ m

Table 2 Result of simulation

	Assumed Value	Calculated Value
O_{xc}	12.00 μ m	12.00 μ m
O_{yc}	23.00 μ m	23.00 μ m

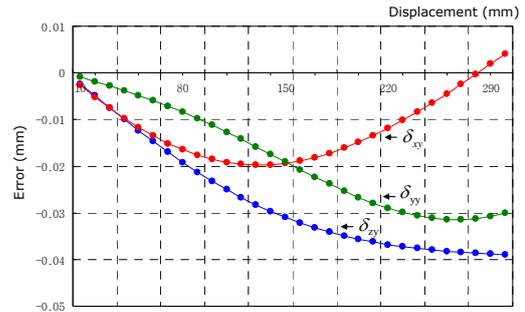


Fig. 4 Generated PDGEPs ($\delta_{xy}, \delta_{yy}, \delta_{zy}$)

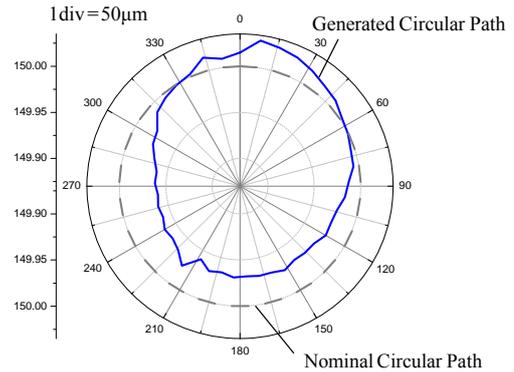


Fig. 5 Generation of circular path for simulation

4. 결론

본 논문에서는 볼바를 사용하여 직선축과 회전축의 PIGEPs 측정 방법을 제안하였다. 각 구동축의 PDGEPs를 고려하였으며 2축 동시 구동을 통해 원호 경로를 생성하였다. 제안된 측정 방법을 검증하기 위해 모의 실험을 진행하였으며, 측정된 오프셋은 생성된 오프셋과 정확하게 일치하였다.

후기

이 논문은 정부의 재원으로 한국과학재단의 지원(2009년도 국가지정연구실사업)을 받아 수행된 연구임(No. R0A-2007-000-10045-0).

참고문헌

- Mayer, J. R. R., Cloutier, G., "Theory and Simulation for the Identification of the Link Geometric Errors for a Five-axis Machine Tool using a Telescoping Magnetic Ball-bar," Int. J. Prod. Res., **40**(18), 4781-4797, 2002.
- 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.
- ISO 230-1, "Acceptance Code for Machine Tools Part 1: Geometry Accuracy of Machines Operated under No-load or Finishing Condition," ISO, 1996.
- Uddin, M. S., Matsubara, A., "Prediction and Compensation of Machining Geometric Errors of Five-axis Machining Centers with Kinematic Errors," Precision Engineering, **33**, 194-201, 2009.
- 이동목, 양승한, "공작기계의 기하학적 오차 합성 모델링을 위한 수학적 분석 기법," 한국정밀공학회 춘계학술대회 논문집, 71-72, 2008.