

초정밀 미세 형상 가공기의 체적 오차 맵 생성 알고리즘 구현 Generation of volumetric error map for a high precision machine tool

*박성령¹, #양승한², 김태형³

*S. R. Park¹, #S. H. Yang(syang@knu.ac.kr)², T. H. Kim³

¹ 경북대학교 대학원 기계공학과, ² 경북대학교 기계공학부, ³ 두산인프라코어 주식회사

Key words : High precision machine tool, Volumetric error map, Error synthesis model, Geometric errors

기호

- $\delta_x, \delta_y, \delta_z$: 각 구동축의 로컬좌표계 기준 위치오차
- $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$: 각 구동축의 로컬좌표계 기준 각오차
- $\delta'_x, \delta'_y, \delta'_z$: 아베 오프셋(Abbe Offset)의 영향을 제거한 위치오차
- $\delta''_x, \delta''_y, \delta''_z$: 측정 시스템에서 얻은 위치오차
- A_x, A_y, A_z : 아베 오프셋(Abbe Offset)
- O_x, O_y, O_z : 오프셋
- OE_x, OE_y, OE_z : 회전구동축의 오프셋 오차

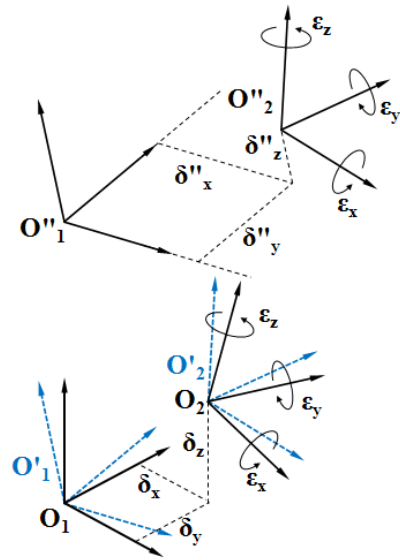
1. 서론

스케일(Scale), 동적(Dynamic), 환경(Environment), 그리고 기하학적(Geometric) 오차 요인에 의해 초정밀한 미세 형상 가공기의 구현에는 많은 어려움이 따른다. 특히 초정밀을 구현하기 위해 고려해야 할 사항 중 기하학적 오차에 대한 해결책의 제시는 중요하다. 산업 현장에서 현재 보유하고 있는 최신 기술을 이용하면 초정밀 가공기를 만들 수 있으나 이는 양산에 있어 가격적인 문제로 발생하게 된다. 이런 이유로 설계 혹은 조립과정에서 최적의 해결책을 찾아야 한다. 각 구동축 및 축 간 관계에 의한 기하학적 오차는 최종적으로 체적 및 자세 오차에 영향을 준다. 설계 과정에서 제시한 체적 및 자세 오차를 구현하기 위해 적용하는 기하학적 오차의 제어는 시스템 구현의 관점에서 한계가 있다. 특히 산업 현장에서는 개발 단계에서 이러한 상관관계를 제시 못하고 있는 것이 실정이다. 이는 초정밀 가공 시스템의 대조립 후 체적 및 자세 오차를 평가하고 설계 값과 다를 경우 체적 및 자세 오차에 영향을 주는 요소를 수정 후 다시 조립을 해야 하는 번거로움이 있다.

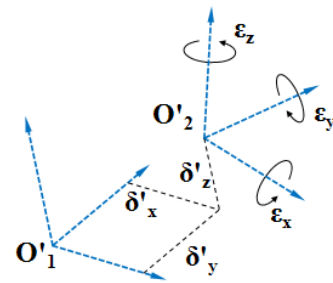
본 논문에서는 공작 기계 산업 현장에서 필요로 하는 체적 오차 맵 생성을 위해 고려해야 할 사항에 대해 다루고 체적 오차 맵 생성 알고리즘을 기술한다. 먼저 체적 오차 맵 생성을 위해 체적 오차의 수학적 기술이 필요하다. 체적 오차의 정의는 기준에 많이 이루어진 연구로 오차합성모델을 기반으로 한다¹⁴. 또한 Abbe Offset의 영향 때문에 측정으로 얻은 데이터는 Abbe Error를 포함하고 있어 본 연구에서 정의한 체적 오차에 바로 적용 못한다. 이러한 Abbe Offset의 영향에 의한 문제점의 해결 방법을 제시한다.

2. 체적 오차 맵 생성

기하학적 오차의 정의에 따라 최종 오차합성모델의 형태는 다르다. 이는 기하학적 오차의 정의가 선행되어야 함을 의미하는 것이고 정의된 오차들은 물리적 혹은 수학적으로 의미가 있어야 한다. 또한 기하학적 오차들의 측정 방법에 따라 오차의 정의가 다르다. 무엇보다 정의한 오차 요소들의 측정이 가능해야 한다. 기하학적 오차 요소들을 정의할 때 사용한 기준 좌표계와 측정 시스템의 기준 좌표계를 일치하여 측정하기는 어려운 일이다. 그래서 본 알고리즘에서는 이러한 기준 좌표계에 대한 불일치를 제거하는 방법을 사용한다. 두 기준 좌표계의 불일치는 Abbe Offset으로 나타나고 Abbe Error의 형태로 기하학적 오차에 포함되어 측정된다. 이 Abbe Error를 제거하는 방법은 Fig.1에서 볼 수 있듯이 좌표계의 변환을 이용한다. Fig. 1(a)에서 좌표계 O_1 은 각 슬라이드가 이상적으로 거동했을 때의 위치이고 O'_1 은 그 때의 측정 좌표계이다. 또한 좌표계 O_2 는 기하학적 오차를 가지고 거동한 구동축의 로컬좌표계이고 O'_2 는 그 때 측정 시스템의



(a) Abbe offset



(b) Coincidence of axis direction

Fig. 1 Relationship between measurement and moving axis coordinate system

실제 거동한 위치와 자세이다. 이로 측정에 의한 오차 데이터와 Abbe error를 제외한 오차들과의 관계를 알 수 있고 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned} \delta'_x &= \delta''_x + \epsilon_z A_y - \epsilon_y A_z \\ \delta'_y &= \delta''_y - \epsilon_z A_x + \epsilon_x A_z \\ \delta'_z &= \delta''_z + \epsilon_y A_x - \epsilon_x A_y \end{aligned} \quad (1)$$

또한 Fig. 1(b)를 보면 측정 좌표계와 구동축의 축 방향이 일치하지 않아 직선 구동축의 경우 측정 데이터가 입력 값에 따라 증가 혹은 감소하는 경향을 가진다. 일반적으로 직선구동축에 대해서는 끝점을 연결하거나 최소자승법을 이용하여 축을 설정하고 측정 좌표계의 방향을 일치시킨다. 회전구동축의 경우 최소자승법으로 축 방향을 설정하고 최소 자승 중심법으로 축의 위치를 설정한다. 이로써 구동축의 기하학적 오차 ($\delta_x, \delta_y, \delta_z, \epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$)가 계산된다. 위와 같은 방법으로 모든 구동축에 대한 축과 기하학적 오차를 설정하게 된다.

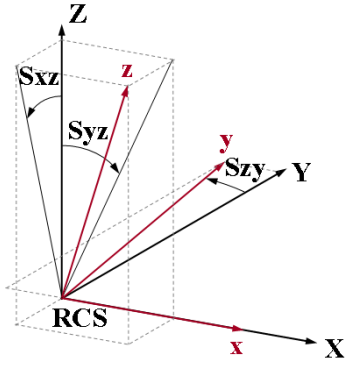
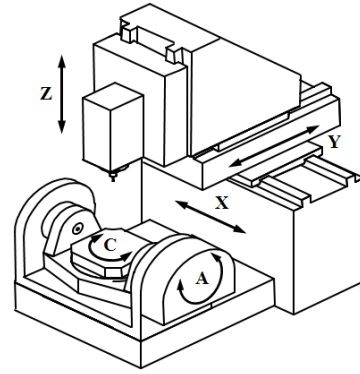
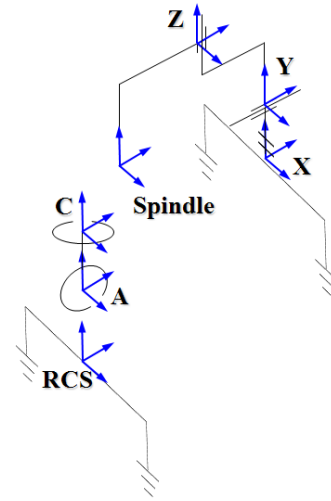


Fig. 2 Reference coordinate system



(a) Table tilting type



(b) System structure

Fig. 3 5-axis machine tool

HTM (Homogeneous Transform Matrix)은 오차모델을 합성할 때 널리 사용하는 방법이다. 본 연구에서도 HTM을 이용하여 오차합성모델을 수학적으로 기술한다. 일반적으로 공작기계의 기준좌표계는 Fig. 2와 같이 X방향의 구동축에 기준좌표계 X방향을 일치시키고 평면 XY위에 Y방향의 구동축을 두게 된다. 본 논문에서는 Fig. 3에서 제시한 테이블 틸팅 형태의 5축 공작기계에 대한 오차합성모델 구현을 예로 제시한다.

설계과정에서 설정한 각 구동축의 로컬좌표계의 상관관계를 오프셋이라 정의하고 이는 설계 공칭 값이다. 축 간 관계 오차(x, a축), 오프셋(x, a축) 및 오프셋 오차(a축)를 HTM으로 표현하면 식(2)와 같다. 축 간 관계 오차, 오프셋 및 오프셋 오차를 포함한 직선구동축(x축)과 회전구동축(a축)의 오차 모델을 예로 들어 표현하면 식(3)과 같다.

$$SO_z = \begin{bmatrix} 1 & 0 & S_y & O_x \\ 0 & 1 & -S_x & O_z \\ -S_y & S_x & 1 & O_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$SO_a = \begin{bmatrix} 1 & -S_z S_y & O_x \\ S_z & 1 & 0 & OE_y + O_z \\ -S_y & 0 & 1 & OE_z + O_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$X = \begin{bmatrix} 1 & 0 & S_y & O_x \\ 0 & 1 & -S_x & O_z \\ -S_y & S_x & 1 & O_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 100x \\ 0100 \\ 0010 \\ 0001 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -\epsilon_z & \epsilon_y & \delta_x \\ \epsilon_z & 1 & -\epsilon_x & \delta_z \\ -\epsilon_y & \epsilon_x & 1 & \delta_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & -S_z S_y & O_x \\ S_z & 1 & 0 & OE_y + O_z \\ -S_y & 0 & 1 & OE_z + O_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -\epsilon_z & \epsilon_y & \delta_x \\ \epsilon_z & 1 & -\epsilon_x & \delta_z \\ -\epsilon_y & \epsilon_x & 1 & \delta_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 \cos a - \sin a & 0 & 0 & 0 \\ 0 \sin a & \cos a & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$f = C^{-1} \cdot A^{-1} \cdot X \cdot Y \cdot Z \quad (4)$$

다음 단계로 Kinematic chain을 이용하여 최종 오차합성모델을 만든다. Bohez¹와 Yang² 연구에서 오차합성모델에 대해 자세히 기술되어 있다. 본 논문에서 제시한 5축 공작기계의 오차합성모델은 식(4)와 같다. 식(4)를 유도하는 방식으로 모든 오차가 없는 이상적인 경우의 모델을 유도한 후 두 식에서 병진 부분의 차를 구하고 벡터 길이를 구하면 체적 오차가 생성된다. 이로 각 구동축의 위치에 따른 체적 오차가 기술된다.

3. 결론

본 논문은 초정밀 미세 형상 가공기의 구현을 위하여 기하학적 오차에 대한 평가방법으로 체적 오차 맵 생성에 대한 알고리즘을 제시했다. 구체적으로 본 알고리즘은 측정과정에서 발생하는

측정오차를 제거하는 방법을 제시했다. 마지막으로 테이블 틸팅 형태 5축 공작기계를 통하여 체적 오차 맵을 생성하는 과정을 보였다.

후기

본 연구는 지식경제부가 주관하는 전략기술개발사업의 지원으로 진행되었으며 지원 기관에 감사드립니다.

참고문헌

- Bohez, E.L.J., Ariyajunya, B., Sinlapecheewa, C., Shein, T.M.M., Lap, D.T., and Belforte, G., "Systematic Geometric Rigid Body Error Identification of 5-axis Milling Machines," Computer Aided Design, 39(4), 229-244, 2007.
- 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," International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 23(7/8), 495-500, 2004.
- Rahman, M., Heikkala, J., and Lappalainen, K., "Modeling, measurement and error compensation of multi-axis machine tools. Part I: theory," International Journal of Machine Tools & Manufacture, 40(10), 1535-1546, 2000.
- Lin, Y. and Shen, Y., "Modelling of Five-Axis Machine Tool Metrology Models Using the Matrix Summation Approach," International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 21(4), 243-248, 2003.