

5 축 공작기계의 기하학적 오차 보정에 관한 연구 Study on Geometric Error Compensation of a 5-axis Machine Tool

*권성환¹, 이동목¹, 박성령¹, #양승한¹

*S. H. Kweon¹, D. M. Lee¹, S. R. Park¹, #S. H. Yang¹ (syang@knu.ac.kr)

¹ 경북대학교 기계공학부

Key words : Geometric Error Compensation, 5-axis Machine Tool, Error Synthesis Model, Volumetric Error

1. 서론

공작기계의 오차에 대한 연구는 크게 세 부분으로 나누어진다. 첫째는 공작기계의 오차를 규명하고 오차가 공작물에 미치는 영향 분석 및 평가이고, 둘째는 오차측정, 그리고 셋째는 오차보정이다. 공작기계의 오차 규명, 분석 및 평가는 새롭게 제작되는 공작기계뿐만 아니라 기 제작되어 산업현장에서 적용되고 있는 기계의 오차평가와 오차보정에 큰 기여를 할 수 있으므로 많은 연구가 이루어졌으며 현재도 많은 연구가 이루어지고 있다. 오차보정에 대한 기존의 연구는 3 축 공작기계에서 많이 이루어졌으며^{2,3}, 최근에는 5 축 공작기계의 사용증가로 인하여 5 축 공작기계의 오차에 대한 연구가 이루어지고 있다^{1,4,5}. 본 연구에서는 5 축 공작기계의 역기구학과 오차합성모델을 이용하여 기하학적 오차보정을 위한 알고리즘을 제안하고 모의실험을 통하여 보정 알고리즘 평가한다.

2. 오차합성모델 및 오차보정 알고리즘

기하학적 오차를 보정하기 위해서는 오차합성모델을 우선적으로 구한다. 3 축 및 5 축 공작기계의 기하학적 오차 평가를 위한 오차합성모델의 구현은 많은 연구가 이루어지고 있다. 본 연구에서는 Fig. 1의 RTTTR 형태의 5 축 공작기계에 대한 오차합성모델을 구현하며, 이를 이용하여 기하학적 오차를 보정하는 보정모델을 구현한다.

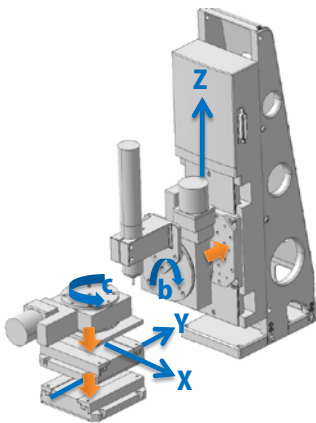


Fig. 1 Configuration of a 5-axis machine tool (RTTTR type)

식(1)과 (2)는 Fig. 1의 RTTTR 형태의 공작기계에 대한 공작물을 기준으로 한 공구 팁의 자세를 동차변환행렬로 표현하였다. 식(1)은 오차를 포함하지 않는 공구 팁의 자세를 나타내고 식(2)는 오차를 포함한 공구 팁의 자세를 나타내는 오차합성모델이다.

$$\tau_{p,N}^i = \tau_{p,N}^c \tau_{c,N}^y \tau_{y,N}^x \tau_{x,N}^o \tau_{o,N}^z \tau_{z,N}^b \tau_{b,N}^i \quad (1)$$

$$\tau_p^i = \tau_p^c \tau_c^y \tau_y^x \tau_x^o \tau_o^z \tau_z^b \tau_b^i \quad (2)$$

공작기계의 체적오차는 식(1)과 (2)를 이용하여 식(3)과 같이 구한다.

$$\mathbf{E}_v = \tau_p^i - \tau_{i,N}^p \quad (3)$$

$$\text{여기서, } \mathbf{E}_v = \begin{bmatrix} \Delta a_x & \Delta s_x & \Delta n_x & \Delta P_x \\ \Delta a_y & \Delta s_y & \Delta n_y & \Delta P_y \\ \Delta a_z & \Delta s_z & \Delta n_z & \Delta P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

본 연구에서는 Fig. 2 처럼 오차합성모델로부터 공구 팁의 오차행렬을 분리하여 오차를 보정하는 방법을 제안한다. 제안한 방법은 Newton 방법^{1,4}의 복잡한 수치해석과 단순반복 보정이나 Decoupling 방법에서 발생하는 반복 계산⁵을 피할 수 있다.

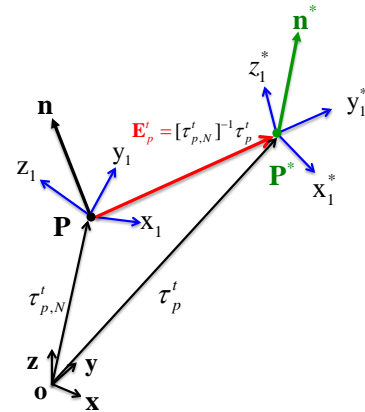


Fig. 2 Concepts of error compensation using error matrix

식(2)의 오차합성모델은 식(4)와 같이 공구 팁의 이상적인 자세를 나타내는 행렬과 공구 팁의 오차행렬로 분리하여 표현한다.

$$\tau_p^i(\mathbf{r}_N) = \tau_{p,N}^i(\mathbf{r}_N) \mathbf{E}_p^i(\mathbf{r}_N) \quad (4)$$

$$\mathbf{E}_p^i = \begin{bmatrix} 1 & -\lambda_z & \lambda_y & \mu_x \\ \lambda_z & 1 & -\lambda_x & \mu_y \\ -\lambda_y & \lambda_x & 1 & \mu_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{P} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서, $\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1 & -\lambda_z & \lambda_y \\ \lambda_z & 1 & -\lambda_x \\ -\lambda_y & \lambda_x & 1 \end{bmatrix}$, $\mathbf{P} = \begin{bmatrix} \mu_x \\ \mu_y \\ \mu_z \end{bmatrix}$ 이며 각각 회전오차 행렬과 위치오차 벡터이다.

식(4)로부터 공구 팁의 오차행렬은 식(6)과 같이 나타내며 오차행렬의 역 행렬을 계산하고 고차 항을 제거하여 식(7)의 오차행렬의 역 행렬을 구한다.

$$\mathbf{E}_p^i(\mathbf{r}_N) = [\tau_{p,N}^i(\mathbf{r}_N)]^{-1} \tau_p^i(\mathbf{r}_N) \quad (6)$$

$$[E'_p]^* = \begin{bmatrix} \mathbf{R}^T & -\mathbf{R}^T \mathbf{P} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \lambda_z & -\lambda_y & -\mu_x \\ -\lambda_z & 1 & \lambda_x & -\mu_y \\ \lambda_y & -\lambda_x & 1 & -\mu_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

식(6)의 $[\tau'_{p,N}(\mathbf{r}_N)]^{-1}$ 을 식(7)로 치환하여 식(8)과 같이 오차를 보정하기 위한 오차보정 모델을 구하고, 관절 보정 값 \mathbf{r}_C 는 역기구학을 이용하여 계산한다.

$$\tau'_{p,N}(\mathbf{r}_C) = \tau'_{p,N}(\mathbf{r}_N)[E'_p(\mathbf{r}_C)]^* \quad (8)$$

3. 모의실험 및 결과

각 관절의 오차요소를 기존의 공작기계에서 측정된 오차들을 토대로 랜덤하게 생성하였으며 Fig. 3의 자유곡면에 적용을 하여 모의실험을 하였다.

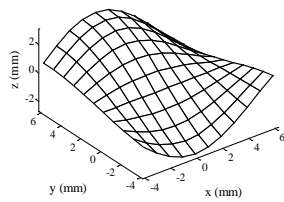


Fig. 3 Free-form surface

Table 1과 2는 공작기계의 기하학적 오차에 의한 Fig. 3의 자유곡면에 발생하는 체적오차다. 체적오차의 최대값만 나타내고 각 오차요소는 지면상 생략하였다.

Table 1 Volumetric error : positional error

	ΔP_x	ΔP_y	ΔP_z
Error Value, Max. (mm)	36.9×10^{-3}	35.8×10^{-3}	12.6×10^{-3}

Table 2 Volumetric error : orientational error

	Δn_x	Δn_y	Δn_z
Error Value, Max. (rad)	3.57×10^{-5}	6.6×10^{-5}	2.04×10^{-5}

제안한 오차보정 알고리즘을 이용하여 기하학적 오차보정을 한 후의 체적오차를 Fig. 4에 그래프로 나타내었다. 보정 후의 위치오차와 방향오차가 작은 값을 나타내며 전체적으로 기하학적 오차에 대한 보정이 잘 이루어졌다고 할 수 있다.

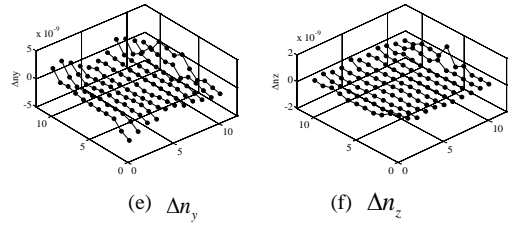
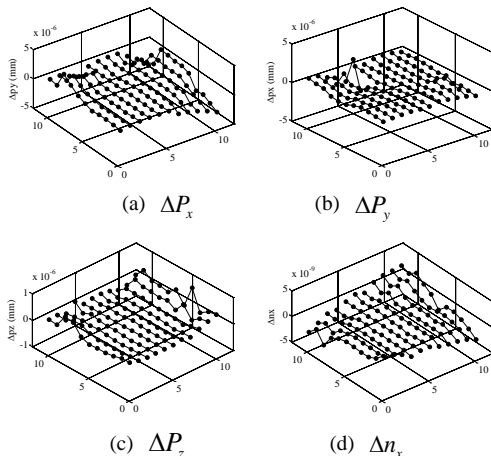


Fig. 4 Positional and orientational error after compensation

Table 3과 Table 4의 결과처럼 최대 위치오차와 최대 방향오차가 각각 10^{-6} mm와 10^{-9} 정도로서 보정 전의 최대오차와 비교했을 때 오차보정이 잘 이루어졌다고 할 수 있다.

Table 3 Volumetric error after compensation : positional error

	ΔP_x	ΔP_y	ΔP_z
Error Value, Max. (mm)	2.0×10^{-6}	3.2×10^{-6}	0.8×10^{-6}

Table 4 Volumetric error after compensation : orientational error

	Δn_x	Δn_y	Δn_z
Error Value, Max. (rad)	3.4×10^{-9}	2.6×10^{-9}	1.2×10^{-9}

4. 결론

오차합성모델, 역기구학과 오차행렬을 이용하여 빠르고 간단하게 기하학적 오차를 보정하는 방법을 제안하였다. 오차합성모델로부터 오차행렬을 분리하여 사용함으로써 오차보정을 쉽게 구현할 수 있다. 복잡한 수치적 계산이 불필요하므로 계산시간이 줄일 수 있으며 NC 제어기에 적용하기 쉽고 실시간 오차 보정이 가능하다.

기존의 공작기계에서 측정된 오차들을 토대로 하여 오차를 랜덤하게 생성하고 제안한 보정 알고리즘에 적용하여 모의실험을 수행하였으며, 제안한 알고리즘이 5축 공작기계의 기하학적 오차 보정 모델로서 적합함을 알 수 있다.

후기

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

참고문헌

1. 양승환,이철수, "5축 CNC 공작기계의 오차합성모델링 및 보정 알고리즘," 한국정밀공학회지,16권 제8호, 122-129,1999.
2. Yang, S.H., Yuan, J. and Ni, J., "Accuracy enhancement of a horizontal machining center by real-time error compensation," J. of Manuf. Systems, 15, 1996.
3. Lee, J.H., Liu, Y., and Yang, S.H., "Accuracy improvement of miniaturized machine tool : Geometric error modeling and compensation," Int. J. of Mach. Tools & Manuf., 43, 1508-1515, 2006.
4. Lei, W.T., and Hsu, Y.Y., "Accuracy enhancement of five-axis CNC machines through real-time error compensation," Int. J. of Mach. Tools & Manuf., 43, 871-877,2003.
5. Hsu, Y.Y., and Wang, S.S., "A new compensation method for geometry errors of five-axis machine tools," Int. J. of Mach. Tools & Manuf.,47, 352-360,2007.