

# 하이브리드구조를 사용한 공작기계의 오차 민감도 표현 Representation of Sensitivities with respect to Geometric Errors for a Hybrid-Structure Machining Center

\*고동주<sup>1</sup>, #김태정<sup>2</sup>, 김기태<sup>3</sup>, 나승표<sup>4</sup>

\*Dongju Ko<sup>1</sup>, #Taejung Kim(taejungkim@dankook.ac.kr)<sup>2</sup>, Kie Tae Kim<sup>3</sup>, Seung Pyo Na<sup>4</sup>  
<sup>1</sup>단국대학교 대학원 기계공학과, <sup>2</sup>단국대학교 기계공학과, <sup>3,4</sup>화천기공 기술개발연구소

Key words : Parallel Machine Tool, Inverse Kinematics, Forward Kinematics, Hybrid Machine Tool

## 1. 서론

기계의 운동을 관찰하여 제작 과정 중 발생하는 다양한 기하학적 오차를 보정하는 것은 기계의 정밀도를 유지하기 위해서 필수적인 작업이다. 특정 오차 파라미터를 가정한 상태로 정기구식을 사용하여 주어진 지령을 수행하는 자세를 계산하고 지령된 자세와의 차이를 비교하여 비용함수를 정의한 후, 이를 최소화하도록 오차 파라미터의 값을 결정하는 것이 기구적 오차 보정의 일반적인 방법이다.

본 논문에서는 과구속(over-constrained)조건을 포함한 하이브리드 구조 공작기계에 대해 정기구식을 사용하여 오차에 대한 기계의 민감도를 분석하는 방법을 보이고, 개별 오차가 기계의 운동에 미치는 영향을 살펴본다. 이는 효과적인 비용함수의 설정과 측정방법의 선택에 직접적인 관련이 있다.

## 2. 위치 민감도의 수학적 표현

Fig. 1-(a)에 민감도 분석의 대상이 되는 하이브리드구조의 뼈대(skeleton)를 보이고, 설정한 기하학적 오차 파라미터,

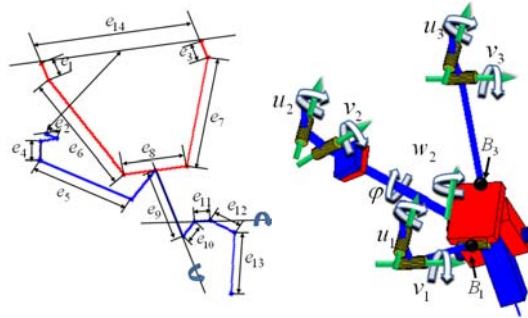
$$\mathbf{E} = [e_1, e_2, \dots, e_{17}]^T$$

를 나타낸다. 이 중  $e_5, e_6, e_7, q_4, q_5$  는 능동관절변수로 영점 설정과 관련된 오차이다. 수동관절변수의 조합을 Fig. 1-(b)와 같이

$$\mathbf{Y} = [u_1, v_1, u_2, v_2, \varphi, w_2, u_3, v_3]^T$$

로 표현하고 정기구식을 풀기 위해 필요한 연립방정식의 미지수로 설정하자.

오차 파라미터  $\mathbf{E}$ 가 주어진 상태에서, 수동관절



(a) (b)  
Fig. 1 A Hybrid Machine Tool

변수  $\mathbf{Y}$ 를 결정하는 8원 연립방정식을 다음의 꼴로 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{G}(\mathbf{Y}, \mathbf{E}) = 0$$

위의 방정식을 풀어 대상 기계의 정기구식

$$\mathbf{E} \rightarrow \mathbf{Y}(\mathbf{E})$$

을 수치적 방법을 통해 결정하는 방법이 보고된 바 있다. [1,2] 수동관절변수가 결정되면 연립방정식을 다음의 꼴로 표현할 수 있다.

$$\mathbf{G}(\mathbf{Y}(\mathbf{E}), \mathbf{E}) = 0$$

이를 오차 파라미터의 조합  $\mathbf{E}$ 로 편미분하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \left[ \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial \mathbf{Y}} \right] \left( \frac{\partial \mathbf{Y}}{\partial \mathbf{E}} \right) + \left( \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial \mathbf{E}} \right) &= 0 \\ \left( \frac{\partial \mathbf{Y}}{\partial \mathbf{E}} \right) &= - \left[ \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial \mathbf{Y}} \right]^{-1} \left( \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial \mathbf{E}} \right) \end{aligned} \quad (1)$$

이 때, 각 항들을 기구학적 고려를 통해 편리하게 구할 수 있음을 [1, 2]에 보인 바 있다. 한편, 기계 종단부의 위치를 다음 꼴로 다룰 수 있다.

$$\mathbf{r}=\mathbf{r}(\mathbf{Y}(\mathbf{E}),\mathbf{E})$$

예를 들어, 주어진 오차 파라미터에 대한 수동관절 변수가 결정되면 중앙 직선축을 따라 공구 끝점에 도달하는 경로를 통해 공구 끝점의 위치를 알아낼 수 있음을 나타낸다. 개별 오차 파라미터에 대한 위치 민감도는 다음과 같이 표현된다.

$$\left(\frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \mathbf{E}}\right)=\left(\frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \mathbf{E}}\right)_{\mathbf{Y}}+\left[\frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \mathbf{Y}}\right]\left(\frac{\partial \mathbf{Y}}{\partial \mathbf{E}}\right) \quad (2)$$

여기서,  $(\partial \mathbf{r} / \partial \mathbf{E})_{\mathbf{Y}}$ 는 대칭을 이루는 두 개의 직선축을 무빙플랫폼에서 분리하여 중앙 직선축 및 무빙플랫폼을 경유하여 기계 종단부에 연결되는 직렬 기구를 형성한 상태에서 해당 오차파라미터가 단위속도로 증가할 때의 공구 끝점의 속도로 해석할 수 있다. 예를 들어  $(\partial \mathbf{r} / \partial \mathbf{E})_{\mathbf{Y}}$ 의 앞 두 열을 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 \\ \sin(u_2) \\ -\cos(u_2) \end{bmatrix}$$

식 (1)을 식 (2)에 대입하여 오차 파라미터의 변화에 따른 종속관절변수의 변화를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\left(\frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \mathbf{E}}\right)=\left(\frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \mathbf{E}}\right)_{\mathbf{Y}}-\left[\frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \mathbf{Y}}\right]\left[\frac{\partial \mathbf{G}}{\partial \mathbf{Y}}\right]^{-1}\left(\frac{\partial \mathbf{G}}{\partial \mathbf{E}}\right)$$

위와 같이 표현된 위치 민감도는 오차의 변화에 따른 위치오차를 표현하는 대푯값으로 사용될 수 있다.

### 3. 볼바테스트를 고려한 민감도의 도시적 표현

볼바 테스트를 통해 오차를 추정하고자 할 때는 오차에 따라 두 점 사이의 거리가 변하는 정도를 파악하는 것이 중요하다. 이를 위해, 주어진 위치에서 각 직교축 방향으로 유한한 변의 길이를 가지는 정방체가 오차에 의해 어떻게 변환되는지를 Fig. 2와 같이 나타낼 수 있다.

그림은 대칭성을 유지하는 자세에서 정방체의

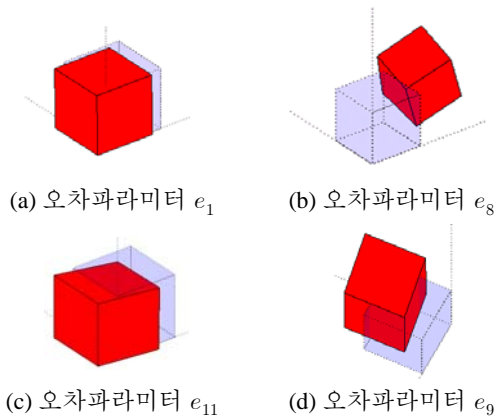


Fig. 2 Volume Transformation due to Finite Errors in Geometric Parameters

‘변형’을 나타낸다. 대부분의 오차파라미터의 경우 정방체의 길이 변화가 크지 않았고, 강체 운동에 가까운 변위를 나타내었다.

### 4. 결론

하이브리드 구조 공작기계의 오차 파라미터의 미소 변화에 대응하는 위치오차를 계산하는 방법을 알아보았고 볼바테스트를 통한 오차 교정을 위해 개별 오차 인자에 의한 작업공간 내에서의 길이변화를 알아보았다. 대칭성을 유지하는 대상 기계의 기준자세에서 기준위치에서부터의 길이 변화가 강체이동의 효과에 비해 미미한 것으로 나타났다.

### 후기

본 연구는 지식경제부가 주관하는 “병렬기구 고유연 머시닝센터 개발” 과제의 지원에 의해 수행되었음.

### 참고문헌

1. 고동주, 김태정, “하이브리드 구조 5축 공작기계의 기구식 수립을 위한 변수 설정,” 한국정밀공학회, 139-140, 2010.
2. 고동주, 나승표, 김태정, “5축 병렬기구 공작기계의 기구식 수립,” 한국정밀공학회, 565-566, 2009.