

OMM 시스템에서 측정방향을 고려한 가공물의 오차평가

최진필*(연세대 대학원), 이상조(연세대 기계공학과), 권혁동(한국생산기술연구원)

Error Prediction Considering the Measurement Direction in OMM System

J. P. Choi(YONSEI Univ.), S. J. Lee(Mechanical Eng. Dept., YONSEI Univ.), H.D.Kwon(KITECH)

ABSTRACT

In this paper, a general procedure to determine machine tool errors from the on-machine measurement (OMM) data is described. First, a parameterized error model of a machine tool is illustrated by approximating error components as linear function of axis positions, and a modified error model is proposed which includes backlash effects. To determine the unknown model coefficient vectors of the forward and backward error model, an artifact with 8 cubes is made and calibrated on CMM. Then, lower-left and upper-right cube corners are measured with a touch-trigger probe mounted on the machine tool spindle. Measured error data are used to determine the coefficient vectors. The positioning errors in the XY plane at the fixed z position are simulated for the forward and backward error model.

Key Words: OMM (On-Machine Measurement), Touch Trigger Probe, Cube-Arrayed Artifact, Volumetric Error Model, Backlash errors

1. 서론

기상측정(On-Machine Measurement, OMM)이란 가공위주의 공작기계에 측정의 기능을 부여하고자 하는 것으로서, 현대의 공작기계로 가공과 측정을 동시에 수행하게 함으로써 제품의 생산비용과 시간을 줄이고 가공정밀도를 높이는 것이 목적이다[1].

터치프로브를 이용하여 공작물을 측정할 경우 측정데이터에는 가공오차 뿐 아니라 공작기계 오차, 프로빙 오차 등이 포함되므로[2], 이러한 오차를 체계적으로 규명하여 측정데이터에서 가공오차만을 분리하는 작업이 필요하다. 이렇게 결정된 가공오차를 제품의 설계데이터와 비교하고, 필요한 경우 공구경로를 수정하여 재가공을 수행함으로써 지시된 공차 이내의 제품을 생산할 수 있게 된다.

OMM 측정데이터에서 가공오차를 분리하기 위해서는 먼저 공작기계의 오차특성을 정확히 파악하여야 한다. 공작기계의 기하학적, 열적 오차를 예측하기 위해 지금까지 많은 연구가 이루어져 왔으며, 본 연구에서는 기존의 동차변환행렬을 이용한 입체오차 모델링 기법을 통해 공작기계의 기하학적 오차를 모델링하였다[3]. 기존의 오차모델은 레이저

간접계 등을 이용하여 각각의 오차성분을 측정하고 이로부터 임의의 축위치에 대한 입체오차를 예측하는데, 이는 측정시간과 비용이 많이 들고 열변형 등의 오차를 능동적으로 보정하기가 어렵다는 단점이 있다.

따라서, 기상측정 시스템에서는 적절한 artifact를 이용하여 기계오차를 측정하고 이로부터 오차모델을 수립하는 방법이 많이 이용되고 있다[4,5]. 본 연구에서는 각각의 오차성분을 선형으로 가정한 후 입체오차모델에 적용하여 모델계수에 대한 행렬방정식을 유도하고, 기상측정 데이터로부터 이러한 모델계수를 추정하였다. 또한, 기계의 이송방향에 따른 오차를 고려하기 위해 오차성분의 백래쉬를 고려한 오차모델을 만들고, 이 때의 백래쉬 벡터도 기상측정 데이터로부터 결정하였다.

오차모델에 필요한 계수벡터를 결정하기 위하여 정밀하게 가공된 8 개의 큐브로 이루어진 artifact를 제작하였다. 각 큐브는 작업공간의 특성을 최대한 반영할 수 있도록 공간상에 배치하였으며, CMM에서 artifact를 캘리브레이션한 후, 터치프로브를 이용하여 각 큐브의 좌하단 꼭지점과 우상단 꼭지점의 좌표를 측정함으로써 정방향과 역방향인 경우의

모델계수를 결정하였다. 마지막으로, 고정된 z 위치에서 x 방향 오차의 변화를 시뮬레이션함으로써 측정방향(혹은 기계이송방향)이 정방향인 경우와 역방향인 경우 오차의 변화를 살펴보았다.

2. 공작기계 오차모델

2.1 입체오차모델

일반적으로 3 축 공작기계는 총 21 개의 오차성분을 가지는데, 이는 각 축방향의 6 자유도 오차와 두 축사이의 직각도 오차를 의미한다. 지령위치에 대해 공구의 실제위치를 예측하기 위해서는 각 이송축의 오차를 동차변환행렬로 표현하고, 기준좌표계에서 공구좌표계에 이르는 동차변환행렬을 연쇄적으로 곱하는 방법이 널리 이용되고 있다[3].

x 방향 직선이송축의 경우 기준좌표계와 이동좌표계 원점 사이의 오프셋량을 a, b, c 라 놓고, 각 축방향의 병진오차를 $\delta_x, \delta_y, \delta_z$, 각 축을 회전축으로 하는 회전오차를 $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ 라 할 때, 기준좌표계에 대한 이동좌표계의 동차변환행렬은 다음과 같다.

$${}^R T_n^{local} = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_z & \varepsilon_y & x+a+\delta_x \\ \varepsilon_z & 1 & -\varepsilon_x & b+\delta_y \\ -\varepsilon_y & \varepsilon_x & 1 & c+\delta_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Fig.1 은 본 연구에 사용된 3 축 공작기계로서 각 좌표계 사이의 관계를 나타내는 동차변환행렬을 위와 같이 구성하고, 이들을 연쇄적으로 곱함으로써 임의의 위치에서 오차를 구할 수 있다.

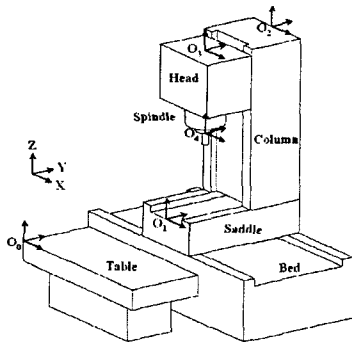


Fig.1 Coordinate system of a three-axis machine tool

$$E_x = \delta_{xx} + \delta_{yy} + \delta_{zz} + \left(z + L + \sum_{i=2}^4 c_i \right) \varepsilon_{zx} + \left(z + L + \sum_{i=3}^4 c_i \right) \varepsilon_{zy} \\ + (L + c_4) \varepsilon_{yz} - \left(y + \sum_{i=2}^4 b_i \right) \varepsilon_{xx} - \left(\sum_{i=3}^4 b_i \right) \varepsilon_{yy} - b_4 \varepsilon_{zz} - y \delta_{zy} - z \delta_{yz}$$

$$E_y = \delta_{yx} + \delta_{yy} + \delta_{yz} - \left(z + L + \sum_{i=2}^4 c_i \right) \varepsilon_{yx} - \left(z + L + \sum_{i=3}^4 c_i \right) \varepsilon_{yy} \\ - (L + c_4) \varepsilon_{yz} + \left(\sum_{i=2}^4 a_i \right) \varepsilon_{xx} + \left(\sum_{i=3}^4 a_i \right) \varepsilon_{yy} + a_4 \varepsilon_{zz} - z \delta_{yz} \\ E_z = \delta_{zx} + \delta_{zy} + \delta_{zz} + \left(y + \sum_{i=2}^4 b_i \right) \varepsilon_{zx} + \left(\sum_{i=3}^4 b_i \right) \varepsilon_{zy} + b_4 \varepsilon_{zz} \\ - \left(\sum_{i=2}^4 a_i \right) \varepsilon_{yx} - \left(\sum_{i=3}^4 a_i \right) \varepsilon_{yy} - a_4 \varepsilon_{yz} \quad (2)$$

2.2 오차성분 근사화를 통한 모델수립

기존의 연구[5]들은 각 오차성분이 이송축의 위치에 대한 함수로 표현가능함을 보이고 있는데, 이는 터치프로브를 이용하여 입체오차를 예측하는데 유용하게 사용될 수 있다. 본 연구에서는 각 오차성분을 축위치에 대한 선형함수로 가정하였다. x 축의 경우 선형오차와 각도오차는 식(3)과 같이 표현할 수 있다.

$$\delta_{xx} = m_1 x \quad (3a)$$

$$\varepsilon_{xx} = p_1 x, \quad \varepsilon_{yx} = p_2 x, \quad \varepsilon_{zx} = p_3 x \quad (3b)$$

직각도 오차는 Fig.2 와 같이 이송축과 직교하는 두 축에 대한 각도오차를 적분하여 얻어진다.

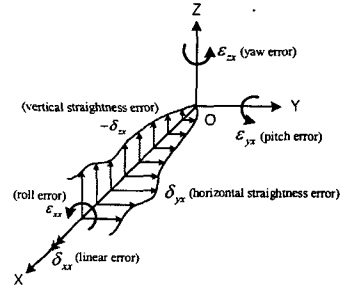


Fig.2 Straightness errors of x-axis

$$\delta_{yx} = \frac{1}{2} p_3 x^2, \quad \delta_{zx} = -\frac{1}{2} p_2 x^2 \quad (4)$$

위와 같이 각 오차성분을 축 위치에 대한 함수로 표현한 후, 오차모델 식(2)에 대입하여 미지의 모델계수에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$\mathbf{E} = \mathbf{Bp} \quad (5)$$

식(5)에서 \mathbf{E} 는 오차벡터, \mathbf{B} 는 축위치에 대한 함수로 표현되는 행렬, \mathbf{p} 는 결정해야할 미지의 모델계수 벡터이다. 오차벡터 \mathbf{E} (3×1)는 터치프로브를 이용하여 artifact 를 측정함으로써 얻을 수 있고, 계수행렬 \mathbf{B} (3×15)는 축위치의 함수로써 측정점의

위치정보로부터 쉽게 구할 수 있다. 모델계수 벡터 \mathbf{p} (3×1)는 아래 관계에서 구해진다.

$$\mathbf{p} = (\mathbf{B}^T \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{E} \quad (6)$$

2.3 백래쉬 오차를 고려한 오차모델

이송축의 오차성분은 이송방향에 따라 백래쉬 오차를 수반하게 되며, 일반적으로 백래쉬 오차는 축위치의 함수이다. 각 오차성분의 백래쉬 오차는 비교적 작은 값을 가지지만, 입체오차는 이들 오차항들이 중첩되어 나타나므로 이들에 의한 영향을 고려할 필요가 있다.

이러한 영향을 오차모델에 포함시키기 위해서, 식(3)의 오차 근사식에 백래쉬 오차항을 다음과 같이 추가한다. 모델을 단순화하기 위해 본 연구에서는 백래쉬 오차를 일정하다고 가정하였다.

$$\delta_{xx,B} = m_1 x + h_1 \quad (7)$$

모든 오차성분을 위와 같이 표현한 후, 식(2)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} E_{x,BWD} &= E_{x,FWD} + h_1 + \left(z + L + \sum_{i=2}^4 c_i \right) h_5 - \left(y + \sum_{i=2}^4 b_i \right) h_6 + \left(z + L + \sum_{i=3}^4 c_i \right) h_8 \\ &\quad - \left(\sum_{i=3}^4 b_i \right) h_9 + (L + c_4) h_{11} - (b_4) h_{12} + h_{15} + h_{17} \\ E_{y,BWD} &= E_{y,FWD} + h_2 - \left(z + L + \sum_{i=2}^4 c_i \right) h_4 + \left(\sum_{i=2}^4 a_i \right) h_6 - \left(z + L + \sum_{i=3}^4 c_i \right) h_7 \\ &\quad + \left(\sum_{i=3}^4 a_i \right) h_9 - (L + c_4) h_{10} + a_4 h_{12} + h_{13} + h_{18} \\ E_{z,BWD} &= E_{z,FWD} + h_3 + \left(y + \sum_{i=2}^4 b_i \right) h_4 - \left(\sum_{i=2}^4 a_i \right) h_5 + \left(\sum_{i=3}^4 b_i \right) h_7 \\ &\quad - \left(\sum_{i=3}^4 a_i \right) h_8 + b_4 h_{10} - a_4 h_{11} + h_{14} + h_{16} \end{aligned} \quad (8)$$

여기에서 $E_{x,FWD}$ 는 x 축이 정방향으로 이송할 경우의 오차로서 식(2)의 E_x 와 같다. 즉, 백래쉬 오차가 반영되지 않은 경우 x 방향의 입체오차를 의미한다. $E_{x,FWD}$ 는 백래쉬 오차를 고려한 경우의 입체오차이다. 식(8)을 행렬방정식으로 다시 쓰면,

$$\mathbf{E}_{BWD} = \mathbf{E}_{FWD} + \mathbf{Fh} \quad (9)$$

E_{FWD} 와 E_{BWD} 는 artifact 를 측정하여 쉽게 얻을 수 있으며, \mathbf{F} 는 식(5)의 \mathbf{B} 와 같이 측정점에 대한 위치정보에서 구할 수 있으므로, 미지의 백래쉬 벡터 \mathbf{h} 는 식(6)과 유사하게 구할 수 있다.

$$\mathbf{h} = (\mathbf{F}^T \mathbf{F})^{-1} \mathbf{F}^T \{ \mathbf{E}_{BWD} - \mathbf{E}_{FWD} \} \quad (10)$$

3. Artifact 를 이용한 모델 계수벡터의 추정

3.1 artifact 설계

식(6)과 식(10)의 오차모델 계수벡터를 결정하기 위해서는 측정점의 수가 최소한 6 개 이상이 되어야 한다. 각 측정점은 x, y, z 방향으로 3 개의 오차성분을 가진다. 또한, 백래쉬 오차를 측정하기 위해서는 정방향과 역방향을 모두 측정할 수 있는 artifact 를 필요로 한다. 이를 위해 본 연구에서는 Fig.3 과 같이 8 개의 큐브로 구성된 artifact 를 제안한다. 각 큐브의 크기는 20mm×20mm, base plate 의 크기는 460mm×320mm 로서 기계의 작업영역을 최대한 포함하도록 하였다. 공작기계상의 측정데이터가 작업공간의 특성을 최대한 반영할 수 있도록 큐브배열을 선정하였다.

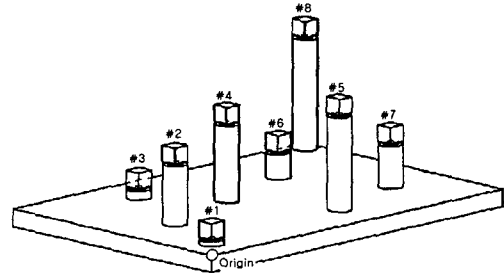


Fig.3 Designed artifact with a cube array

3.2 artifact 캘리브레이션 및 기상측정

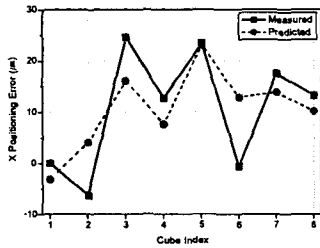
CMM 을 이용하여 artifact calibration 을 수행하였으며, 각 큐브의 좌하측 꼭지점과 우상측 꼭지점의 좌표를 얻는다. 좌하측 꼭지점의 경우 x, y 방향이 모두 정방향(FWD)인 경우이고 우상측 꼭지점의 경우 x, y 방향이 모두 역방향(BWD)인 경우의 측정점이 된다.

캘리브레이션 후 artifact 를 공작기계의 베드위에 설치하고, 공작기계 주축에 장착된 터치프로브를 이용하여 CMM 측정과 동일한 점을 측정하였다. OMM 측정 데이터와 CMM 측정데이터를 비교함으로써 오차벡터를 구성함으로써, 미지의 모델계수 벡터인 \mathbf{p} 와 \mathbf{h} 를 결정할 수 있게 된다. 이렇게 결정된 모델계수를 사용하면, 임의의 축위치에서 기계의 오차를 예측할 수 있게 된다.

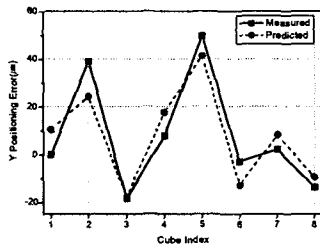
3.3 측정결과 및 시뮬레이션

앞에서 서술한 방법으로 모델계수를 추정하고, 이를 이용하여 각 큐브 꼭지점에서의 오차를 시뮬레이션한 결과를 살펴본다. Fig.4 는 x, y 측정방향이 모두 정방향(Forward)인 경우의 측정오차와 예측오차를 보여주고 있으며, Fig.5 는 측정방향이 모두 역방향(Backward)인 경우의 측정오차와 예측오차이다. 그림으로부터 측정방향에 따라 측정오차가 크게 변화함을 알 수 있다. 또한 시뮬레이션을 통해 예측된 오차값과 측정오차값이 $\pm 10 \mu\text{m}$ 정도로서 비교

적 크게 나타났다. 이는 기계의 반복정밀도, 터치프로브의 프로빙 오차, artifact misalignmnet 등에 기인하며 이러한 오차의 분석을 통해 측정오차와 예측오차의 편차를 줄일 수 있다.

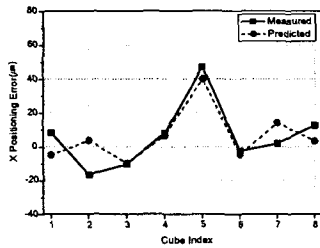


(a) X positioning errors

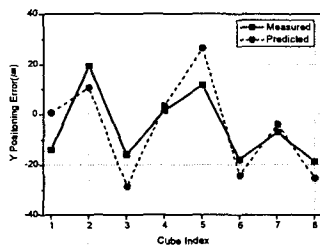


(b) Y positioning errors

Fig.4 Measured and predicted positioning errors of lower-left cube corners (Forward Direction)



(a) X positioning errors

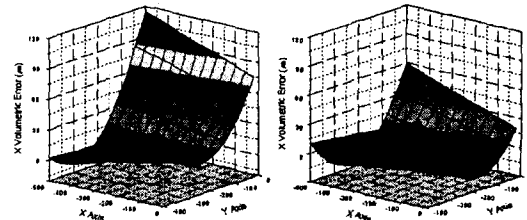


(b) Y positioning errors

Fig.5 Measured and predicted positioning errors of upper-right cube corners (Backward Direction)

Fig.6 은 오차모델에서 계산된 계수벡터를 이용하여 공간상에서 x 축의 위치결정오차를 모의실험한 것이다. Fig.6(a)는 정방향인 경우이고, Fig.6(b)는 역방향인 경우로서 이송방향에 따라 위치결정오차

의 변화량이 상당히 크게 나타남을 알 수 있다.



(a) Forward direction

(b) Backward direction

Fig.6 X positioning errors at Z=-467.0mm

4. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 공작기계의 백래쉬 오차를 고려한 오차모델을 제시하고, 모델계수를 결정하기 위해 8 개의 큐브로 이루어진 artifact 를 이용하였다. 큐브 측정결과와 시뮬레이션 결과를 통해, 기계의 이송방향(즉, 터치프로브의 접근방향)에 따라 측정오차가 크게 달라짐을 알 수 있었다.

향후 오차모델의 타당성을 검증하기 위해 다양한 형상의 공작물을 대상으로 측정실험을 행해야 하며, 본 연구에서는 고려하지 않은 열변형 오차와 터치프로브의 프로빙오차도 오차모델에 포함되어야 한다. 마지막으로, 측정데이터에서 분리된 가공오차를 이용하여 공작물을 재가공함으로써 원하는 정밀도를 가지는 제품을 가공할 수 있어야 한다

참고문헌

1. 김선호, 김동훈, "기상계측을 통한 가공형상 측정 시스템", 한국정밀공학회지, 제 18 권, 제 6 호, pp. 9-18, 2001
2. 조명우, 이세희, 서태일, "CAD/CAM/CAI 통합에 기초한 자유곡면의 On-Machine Measurement:1. 측정오차 모델링", 한국정밀공학회지, 제 16 권, 제 10 호, pp. 172-181, 1999
3. Slocum, "Precision Machine Design", Prentice-Hall, pp.58-76, 1992
4. 김경돈, 정성종, "접촉식 측정프로브를 이용한 2 ½ 언더머신 측정 및 검사시스템의 설계 및 해석", 대한기계학회논문집 A, 제 23 권, 제 1 호, pp. 37-46, 1999
5. 이재종, "CNC 머시닝센터의 공간상의 오차측정 시스템 및 보정에 관한 연구", 박사학위논문, 1999