

## 자가 보정 방법을 이용한 삼차원 측정기의 계통 오차 추출

유승봉\*(한국과학기술원 기계공학과), 김승우(한국과학기술원 기계공학과)

### Error Assessment of CMM by Self-calibration Method

S. B. Yoo\* (Mechanical Eng. Dept. KAIST), S. W. Kim (Mechanical Eng. Dept., KAIST)

#### ABSTRACT

Among the CMM calibration techniques, the calibration with standard specimen is most accurate way to acquire the required precision. When there is no standard specimen, the calibration of CMM with itself is possible. This calibration method is called "self-calibration". In this paper, we developed self-calibration algorithm for CMM XY plane. It is possible to calculate the in-plane error and out-of-plane error of CMM with 3 different measurement of same artifact. Experimental result shows that the non-orthogonality error is dominant in in-plane error and the self-calibration result and laser interferometer measured result have almost same value.

**Key Words :** Self-calibration (자가 보정), Coordinate Measuring Machine (삼차원 측정기), Artifact (측정 시편)

#### 1. 서론

삼차원 측정기는 물체의 기하학적 형상이나 치수를 측정하는 장치이다. 삼차원 측정기의 구성은 데이터를 얻는 지점의 트리거(Trigger) 신호를 주는 프로브(Probe)와 측정 시편과 프로브 사이의 상대운동을 만들어 주는 스테이지(Stage)로 구성된다.

삼차원 측정기는 프로브가 갖는 오차와 스테이지가 구동할 때 발생하는 오차 등을 포함하여 측정 결과에 오차를 포함하게 된다. 결과적으로 측정기의 성능은 이러한 오차를 얼마만큼 최소화 할 수 있는가에 의하여 결정된다. 삼차원 측정기뿐만 아니라 삼차원으로 구동하는 기계들의 오차를 측정하기 위하여 여러 가지 방법들이 제안되어 왔다.<sup>1,2</sup> 삼차원 측정기의 오차를 평가하는 방법들은 크게 다음의 세가지로 분류할 수 있다.<sup>3</sup>

- ① 기구학적 표준을 이용하는 방법
- ② 매개변수를 이용한 보정 방법
- ③ 표준 시편을 이용한 방법

이러한 오차 평가 방법들 중에서 기구학적 표준이나 매개 변수를 이용하는 방법은 직접 측정기의 좌표계의 오차를 계산하는 것이 아니라 기구학적

로 계산된 모델에 의하여 각 성분별로 오차를 계산하기 때문에 측정기의 오차를 정확하게 계산할 수 없다. 이에 비하여 표준 시편을 이용하는 방법은 삼차원 측정기의 왜곡된 좌표계를 직접 이용하여 이미 형상을 알고 있는 표준 시편을 측정함으로써 삼차원 측정기가 갖는 좌표계의 오차를 직접 측정할 수 있는 장점이 있다. 이에 비하여 오차를 평가하고자 하는 측정기의 동작 영역에 해당하는 표준 시편을 제작하는 것이 어렵기 때문에 실제로 적용하는데 어려움이 있다.

자가 보정 방법은 표준 시편과 같은 정확한 시편을 사용하지 않고, 측정기가 갖는 정밀도 수준으로 측정기를 보정하는 방법이다. 자가 보정의 기본 개념은 측정 시편이 항상 일정한 형상을 유지한다는 가정 하에, 동일 측정 시편을 서로 다른 위치에서 측정한 데이터 사이의 차이를 이용하여 측정기의 오차를 계산하는 방법이다.<sup>4</sup>

본 논문에서는 대략의 형상만을 알고 있는 2차원으로 배열된 볼 플레이트(ball plate)를 이용하여 삼차원 측정기가 갖는 좌표계의 오차를 계산하는 방법을 설명한다. 자가 보정 방법을 이용하여 삼차원 측정기가 갖는 좌표계의 오차와 측정 시편의 형상을 동시에 계산하고, 측정기의 오차를 레이저 인터페로미터의 측정값과 비교하였다.

## 2. 자가 보정 알고리즘

### 2.1 오차 함수

2 차원 볼 플레이트의 측정 데이터를 이용하여 삼차원 측정기의 오차를 보정하는 알고리즘을 유도하기 위하여 2 차원에서의 오차함수를 정의한다. 먼저 측정기의 오차함수  $G(x, y, z)$ 는 측정기의 좌표와 이상적인 좌표계에서의 좌표의 차이로 정의된다. 같은 방법으로 자가 보정에 사용하게 될 볼 플레이트 시편의 각 위치도 정확한 위치에서 벗어난 오차를 갖게 된다. 이 오차를 시편의 오차함수  $A(x, y, z)$ 로 정의한다. 이때  $G(x, y, z)$ ,  $A(x, y, z)$ 는 각각 3차원의 성분을 갖는 벡터이다.  $N \times N$  개의 강구로 이루어진 볼 플레이트를 시편으로 사용할 때, 각 강구의 설계상의 위치를  $(x_m, y_n, 0)$ 라고 하면 설계 위치에서의 측정기의 오차함수를 다음 식 (1)과 같이 첨자를 써서 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} G_{m,n} &= G(x_m, y_n, 0) \\ &= \begin{pmatrix} G_x(x_m, y_n, 0) \\ G_y(x_m, y_n, 0) \\ G_z(x_m, y_n, 0) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} G_{x,m,n} \\ G_{y,m,n} \\ G_{z,m,n} \end{pmatrix} \quad (1) \\ \text{where } m, n &= \frac{N-1}{2}, \dots, \frac{N-1}{2} \end{aligned}$$

시편의 오차함수의 경우도 마찬가지로 첨자로 표시할 수 있다. 측정기의 오차함수는 이상적인 좌표계와 측정기가 갖는 좌표 사이의 강체운동에 의한 병진운동 오차와 회전운동 오차가 없다고 가정할 수 있다. 두 좌표계 사이의 축척에 의하여 발생하는 오차는 추후에 기준 길이를 갖는 시편을 이용하여 보정할 수 있으므로 이 값을 무시할 수 있다. 이상의 조건은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \sum_{m,n} G_{x,m,n} &= \sum_{m,n} G_{y,m,n} = \sum_{m,n} G_{z,m,n} = 0 \\ \sum_{m,n} (x_m G_{y,m,n} - y_n G_{x,m,n}) &= 0 \\ \sum_{m,n} (x_m G_{x,m,n} + y_n G_{y,m,n}) &= 0 \\ \sum_{m,n} x_m G_{z,m,n} &= \sum_{m,n} y_n G_{z,m,n} = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

같은 식으로 시편의 오차함수의 경우도 좌표계 불일치에 의한 병진운동 오차와 회전운동 오차를 무시할 수 있다. 하지만 시편의 경우 축척에 의한

오차가 존재할 수 있으므로 식 (3)과 같은 조건으로 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned} \sum_{m,n} A_{x,m,n} &= \sum_{m,n} A_{y,m,n} = \sum_{m,n} A_{z,m,n} = 0 \\ \sum_{m,n} (x_m A_{y,m,n} - y_n A_{x,m,n}) &= 0 \\ \sum_{m,n} x_m A_{z,m,n} &= \sum_{m,n} y_n A_{z,m,n} = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

### 2.2 알고리즘

일반적으로 2 차원에서 자가 보정을 수행하기 위해서는 동일한 시편을 서로 다른 세가지 위치에서의 측정이 필요하다.<sup>5</sup> 시편의 세가지 측정 위치를 각각 view 0, view 1, view 2 라고 할 때, view 0를 기준으로 view 1은 시편의 중심을 기준으로 90° 회전한 위치에서의 측정 데이터이고, view 2는 view 0을 기준으로 시편의 강구사이의 거리만큼 x 축 방향으로 이동한 위치에서의 측정 데이터를 사용한다.<sup>6</sup>

그림 1은 시편과 측정기에 오차가 존재할 경우 시편의 위치를 측정할 경우 얻어지는 측정데이터를 나타낸다. 실제 측정 데이터는 그림 2에 나타난 측정데이터에 시편과 측정기의 좌표축이 불일치하여 나타나는 정렬오차까지 포함된다. 따라서 세가지 위치에서의 측정 데이터는 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

View 0:

$$\begin{pmatrix} V_{0,x,m,n} \\ V_{0,y,m,n} \\ V_{0,z,m,n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} G_{x,m,n} + A_{x,m,n} + E_{0,x,m,n} \\ G_{y,m,n} + A_{y,m,n} + E_{0,y,m,n} \\ G_{z,m,n} + A_{z,m,n} + E_{0,z,m,n} \end{pmatrix}$$

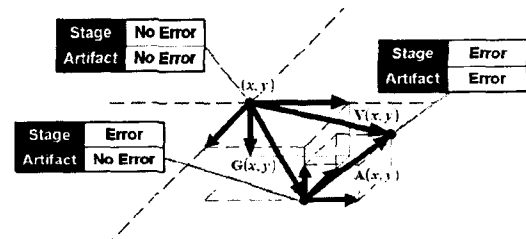


Fig. 1 Concept of artifact measurement: (a) If CMM and artifact is perfect, the desired position will be measured. (b) If artifact is perfect but CMM has error, the deviation between measured position and desired position is the error of CMM. (c) If both of CMM and artifact has error, the measured data is superposition of CMM error and artifact error.

View 1:

$$\begin{pmatrix} V_{1,x,m,n} \\ V_{1,y,m,n} \\ V_{1,z,m,n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} G_{y,-n,m} - A_{y,m,n} + E_{1,x,m,n} \\ G_{x,-n,m} + A_{x,m,n} + E_{1,y,m,n} \\ G_{z,-n,m} + A_{z,m,n} + E_{1,z,m,n} \end{pmatrix} \quad (4)$$

View 2:

$$\begin{pmatrix} V_{2,x,m,n} \\ V_{2,y,m,n} \\ V_{2,z,m,n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} G_{x,m+1,n} + A_{x,m,n} + E_{2,x,m,n} \\ G_{x,m+1,n} + A_{x,m,n} + E_{2,x,m,n} \\ G_{x,m+1,n} + A_{x,m,n} + E_{2,x,m,n} \end{pmatrix}$$

식 (4)에서 좌변은 측정을 통하여 얻어지는 값이고 우변의  $E_{0,x,m,n}$  등은 다음 식 (5)와 같이 주어지는 정렬 오차이다.

$$\begin{pmatrix} E_{i,x,m,n} \\ E_{i,y,m,n} \\ E_{i,z,m,n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_{i,x} \\ t_{i,y} \\ t_{i,z} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & -\theta_i & \psi_i \\ \theta_i & 0 & -\phi_i \\ -\psi_i & \phi_i & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_m \\ y_n \\ 0 \end{pmatrix} \quad (5)$$

식 (4)와 식 (2), (3)을 이용하면 측정값 중에서 정렬에 의하여 발생할 수 있는 오차를 계산할 수 있다. 식 (4)에서 정렬오차에 해당되는 부분을 좌변으로 넘기고, 서로 다른 측정에서 포함되어 있는 시편의 오차를 제거하면 측정기의 오차에 관한 식 (6), (7)과 같은 식을 얻을 수 있다.

(View 0)-(View1)

$$\begin{aligned} G_{x,m,n} - G_{y,-n,m} &= U_{0,x,m,n} - U_{1,y,m,n} \\ G_{y,m,n} + G_{x,-n,m} &= U_{0,y,m,n} + U_{1,x,m,n} \\ G_{z,m,n} - G_{z,-n,m} &= U_{0,z,m,n} - U_{1,z,m,n} \end{aligned} \quad (6)$$

(View 2)-(View 0)

$$\begin{aligned} G_{x,m+1,n} - G_{x,m,n} &= U_{2,x,m,n} - U_{0,x,m,n} \\ G_{y,m+1,n} - G_{y,m,n} &= U_{2,y,m,n} - U_{0,y,m,n} \\ G_{z,m+1,n} - G_{z,m,n} &= U_{2,z,m,n} - U_{0,z,m,n} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\text{where } \mathbf{U}_{i,m,n} = \mathbf{V}_{i,m,n} - \mathbf{E}_{i,m,n} \quad (i=0,1,2)$$

식 (6)과 식 (7)은 측정기의 오차 함수  $\mathbf{G}(x, y, z)$ 에 대한 점화식의 형태로, 우변에 나타난 항들은 측정과 앞서 설명한 알고리즘을 통하여 모두 계산한 값들이다. 이 두 식을 이용하여 첨자  $m, n$ 을 변화시켜 가면서 측정기의 동작영역 전체의 오차함수를 계산할 수 있다.

### 3. 실험 결과

#### 3.1 실험 장치

자가 보정 방법을 이용하여 삼차원 측정기의 오차를 계산하기 위하여 독일 WEGU사에서 제작한 삼차원 측정기를 이용하여 측정 시편으로 제작한 볼 플레이트를 측정하였다. 그림 2는 측정에 사용된 볼 플레이트와 이를 장착하기 위한 지그의 모습을 보여준다. 볼 플레이트는 7×7개의 볼을 평면상에 배치하여 제작하였으며, 사용된 강구는 진구도가 0.1 μm 이하의 것으로 사용하였다. 이를 장착하기 위한 지그는 기구학적으로 장착이 가능하도록 3-ball and V groove 형상을 가지도록 설계하였다.

#### 3.2 실험 결과

그림 3은 삼차원 측정기를 이용하여 볼 플레이트를 15회 측정하였을 때 각 강구의 중심위치에 대한 반복능을 보여준다. 그림에서 X 축은 볼 플레이트의 왼쪽 아래를 1로부터 오른쪽 위를 49로 하여 번호를 매긴 것이다. 강구의 중심 위치를 측정할 경우 반복능이 최대 6 μm 이하로 나타나는 것을 확인할 수 있다.

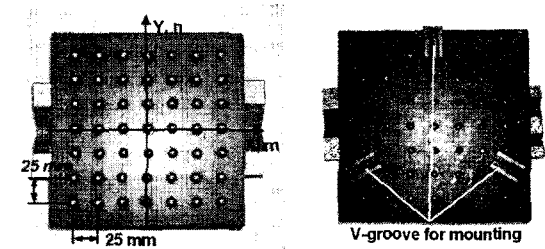


Fig. 2 Ball plate artifact for self-calibration: Only nominal positions but exact positions of steel balls are known. Front side (left), back side (right)

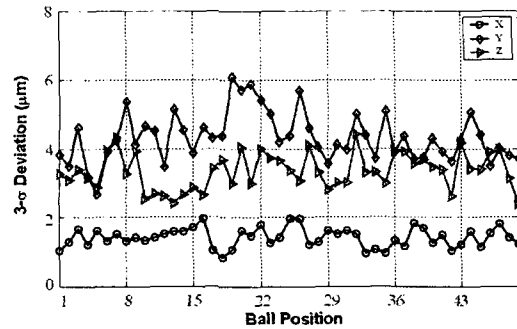


Fig. 3 Repeatability of ball center position with 15-times measurement: X-axis is ball position numbered left-lower corner as 1 and right-upper corner as 49.

그림 4와 그림 5는 앞서 설명한 알고리즘을 이용하여 삼차원 측정기가 갖는 오차를 계산한 내용이다. 그림 4에서 살펴보면 2차원 평면상에서의 오차가 최대 6.2  $\mu\text{m}$  이하가 되는 것을 확인할 수 있다. 또 전체적인 오차의 형상이 직각도 오차에 의한 영향이 지배적으로 나타나는 것을 확인할 수 있다. 그림 4의 결과를 이용하여 측정기의 X축과 Y축이 갖는 직각도 오차를 계산해 보면 각도 값으로 6.9 arcsec의 오차를 계산할 수 있다. 동일한 측정을 레이저 인터페로미터의 직각도 모듈을 이용하여 측정하면 9.3 arcsec의 직각도 오차를 얻었다.

그림 5는 삼차원 측정기의 X축과 Y축이 이루는 평면이 실제 이상적인 평면에서 벗어나는 정도를 보여준다. 삼차원 측정기의 XY 평면은 이상적인 평면에 대하여 1.1  $\mu\text{m}$  이하의 오차를 갖고 있는 것을 확인할 수 있다.

#### 4. 결론

자가 보정 방법을 이용하여 삼차원 측정기의 좌표계 중 X축과 Y축이 이루는 평면의 오차를 계산하는 알고리즘을 제안하였다. 이를 토대로 대략적인 형상만을 알고있는 불 플래이트를 시편으로 제작하여 이를 여러 위치에서 측정하여 측정기가 갖는 오차를 계산하였다. 삼차원 측정기의 두 좌표축이 갖는 직각도 오차를 레이저 인터페로미터의 측정값과 비교하였다. 이러한 방법을 삼차원 측정기의 다른 두 축이 이루는 평면에 대하여 적용하면 삼차원 측정기의 동작영역 전체에 대한 보정이 가능할 것으로 보인다.

#### 후 기

본 연구는 창의적 연구 진흥사업의 지원으로 수행되었음.

#### 참고문헌

1. P. A. C. Miguel, et al., "Coordinate measuring machines: concept, classification and comparison of performance tests", *International Journal of Quality & Reliability Management*, v.12, n.8, pp.48-63, 1995
2. Allison Venner, "The Straight story: The who, what, when, where, why and how of CMM calibration", *American Machinist*, Feb., p.66-74, 2000
3. J. Silva, et al., "A modular space frame for assessing the performance of coordinate measuring machines", *Precision Engineering*, vol.26, no.1, p. 37-48, 2002
4. C. J. Evans, et al. "Self-calibration: Reversal,

Redundancy, Error Separation, and Absolute Testing", *Annals of the CIRP*, Vol.45/2, pp.617-634, 1996

5. M. R. Raugh, "Absolute two-dimensional sub-micron metrology for electron beam lithography: A calibration theory with applications", *Precision Engineering*, vol. 7(1), pp.3-13, 1985
6. J. Ye, et al., "An Exact Algorithm for self-calibration of two-dimensional precision metrology stages", *Precision Engineering*, vol. 20(1), pp.16-32, 1998

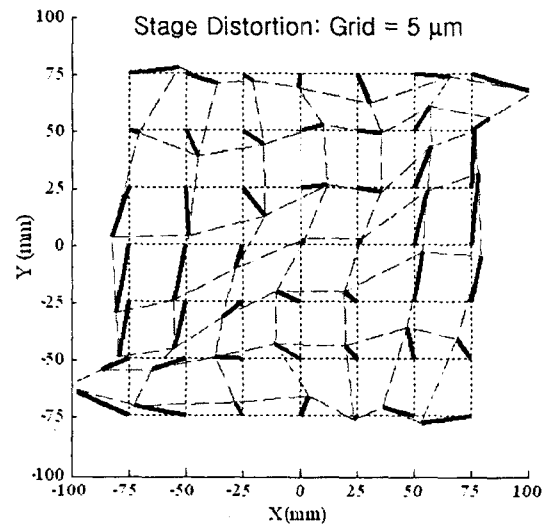


Fig. 4 In-plane error of CMM coordinate: the dotted line is nominal position of CMM and the dashed line is actual position. The deviation between two values is magnified, as one nominal position grid is 5  $\mu\text{m}$  for actual position. Max. X deviation is 5.4  $\mu\text{m}$  and max. Y deviation is 6.2  $\mu\text{m}$ .

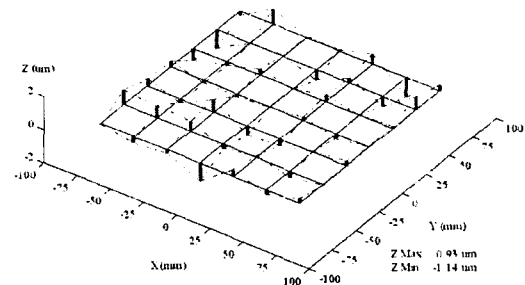


Fig. 5 Out-of-plane error of CMM coordinate: Max deviation is 1.1  $\mu\text{m}$  from nominal plane.