

# 광학현미경을 이용한 비접촉식 치수측정시스템의 교정

박현구\*, 박민철\*, 김승우\*

## Calibration of Optical Dimensional Measurement System Using Optical Microscope

Hyun-Goo Park\*, Min-Cheol Park\*, Seung-Woo Kim\*

### ABSTRACT

Non-contacting optical microscopes are increasingly used in recent industrial applications of probes for coordinate measuring machines. They have been found more efficient than conventional touch trigger probes with ball tips especially in inspecting small-sized objects. There are two major factors affecting measuring accuracy: (1) geometric relations between coordinate systems, (2) magnification ratios of a microscope. In order to determine the magnification ratios exactly, optical imaging of edge was theoretically analyzed and practically adopted to image processing for edge detection. In addition, this paper proposes a geometric calibration method to obtain exact coordinates of measured points from the relations between the machine coordinate system and the image. In the method, the error according to the squareness between the machine axes was also removed. The method was practically adopted to a real coordinate measuring machine. An ultraprecision measurement of 0.2  $\mu\text{m}$  uncertainty can be practically achieved.

**Key Words:** Optical Microscope(광학현미경), CMM(삼차원좌표측정기: Coordinate Measuring Machine), Imaging Optics(영상광학), Geometric Calibration(기하학적 교정)

### 1. 서론

영상광학(imaging optics)의 정밀측정 분야에 대한 응용은 망원경과 현미경의 발명으로부터 시작되어 오랜 역사를 가지고 다양한 형태의 광학계들로 발전되어 왔다. 특히 최근에 들어서는 기존의 영상광학과 새로운 광전자 기술이 복합적으로 활용되어 영상광학을 이용한 정밀측

정 기술분야에 획기적인 발전을 이룩하고 있다.

비전프로브는 현미경광학계와 머신비전(machine vision)기술의 복합형태로 정밀가공 부품의 치수 및 위치 측정의 자동화를 목적으로 광학계 및 신호처리부로 구성된다. 광학계로는 현미경에 널리 이용되는 고배율의 대물렌즈(objective), 조명(illumination) 그리고 집광렌즈(condenser lens)가 사용된다. 광전자부는 CCD소자와

\* 한국과학기술원 기계공학과

영상신호를 디지털신호로 변환하는 영상취득회로로 구성 되어 있고, 컴퓨터 내에서 적절한 영상처리 과정을 통해 원하는 제품의 형상과 위치를 측정한다. 현재 이러한 비전프로브는 비접촉 삼차원측정기를 위시하여 많은 산업 기계들에서 다양한 용도로 활용되고 있다<sup>(1,3,4)</sup>.

삼차원측정기에서 CCD카메라가 장착된 비전프로브를 사용하는 경우 측정대상물을 비접촉상태로 검사함과 동시에 다양한 영상처리기법을 사용하여 많은 측정점들을 동시에 획득할 수 있는 장점을 갖는다. 반면 정밀한 측정을 위해서는 사용되는 비전프로브 자체의 배울 및 측정대상물의 에지 검출시 야기되는 불확실도에 대한 엄밀한 교정과 비디오프로브와 삼차원측정기사이의 정교한 기하학적 교정이 요구된다. 현재 비전프로브의 사용은 점차 증대되고 있으나 이 분야에 대한 연구가 미흡하여 접촉식 프로브와 비교하여 현저히 낮은 측정정밀도를 얻고 있는 실정이다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하고자 다음의 세 주제에 대한 해석적 방법을 제안하고 이의 실험 결과를 소개하고자 한다.

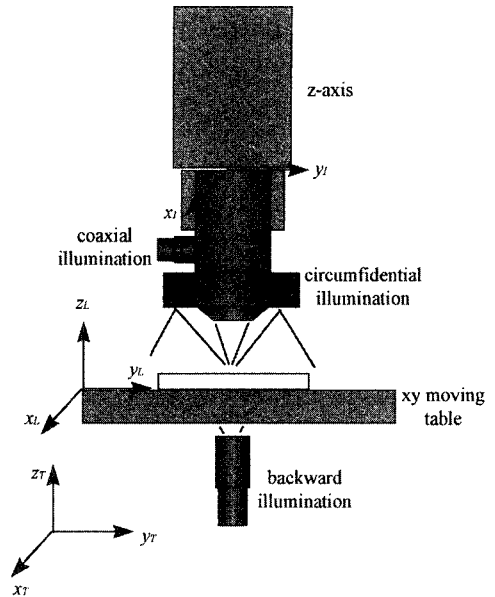


Fig. 1 Non-contacting coordinate measuring machine

(1) 비전프로브가 갖는 에지의 광학적 현상을 규명하고 이로부터 에지검출시 야기되는 불확실도를 해석적으로 규명하였다<sup>(5,13)</sup>.

(2) 상기 결과로부터 에지검출의 불확실도를 제거하여 비전프로브의 배울을 교정 할 수 있는 방법을 제안하였다.

(3) 최종적으로 비전프로브와 삼차원측정기간의 기하학적 관계를 교정하는 방법을 도출하고 이의 타당성을 실험적으로 입증하였다.

## 2. 비접촉 좌표 측정기의 교정

Fig.1은 비접촉 측정시스템의 좌표계사이의 관계를 보여준다. 비접촉 좌표측정기는 직교하는 세 축(x, y, z)으로 구성되며 각 축은 모터와 위치검출기에 의해 독립적으로 구동된다. 측정대상물은 xy구동 축이 부착된 스테이지 상에 놓여 이송되고 비전프로브는 z축에 부착되어 측정을 수행한다. 측정기를 구성하는 주요 요소들의 세부적인 기하학적 관계를 유도하기 위하여 세 개의 좌표계가 요구되며 이들을 측정좌표계  $(x_T, y_T, z_T)$ , 기계구동좌표계  $(x_L, y_L, z_L)$ , 비전프로브의 영상좌표계  $(x_I, y_I)$ 로 정의한다. 측정좌표계  $(x_T, y_T, z_T)$ 는 측정 대상물의 삼차원 측정 결과를 최종적으로 결정하기 위해 사용되는 기준

직각좌표계로 좌표측정기의 몸체에 고정된다. 기계구동좌표계  $(x_L, y_L, z_L)$ 는 측정기의 각 축이 갖는 위치검출기의 설치 방향으로 정의되며 기계의 조립 오차에 의해 엄밀한 직교성을 유지 못하는 특성을 갖는다. 영상좌표계  $(x_I, y_I)$ 는 영상광학계의 수광소자인 CCD 내의 측정좌표계로 2차원적으로 정의된다. 아울러, 이들 좌표축은 삼차원 측정기가 이상적으로 조립된 경우 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$\begin{bmatrix} x_T \\ y_T \\ z_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_L \\ y_L \\ z_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_I \\ y_I \\ \Delta z \end{bmatrix} \quad \text{또는} \quad \bar{x}_T = \bar{x}_L + \bar{x}_I \quad (1)$$

교정은 먼저 레이저간섭계등을 이용하여 이상적인 3축 좌표계에 대한 기계구동좌표계의 정렬오차를 보정하고, 보정된 기계좌표계에 대한 영상좌표계의 정렬오차를 측정하여 교정하는 순서로 이루어진다. 이와 병행하여 배울 교정시편을 이용한 영상좌표계의 배울교정이 수행된다.

## 3. 영상광학계의 에지 검출의 불확실도

Fig.2는 비전프로브를 구성하는 일반적인 광학계의 구성도이다. 광원으로부터 방사된 광속은 콘덴서렌즈

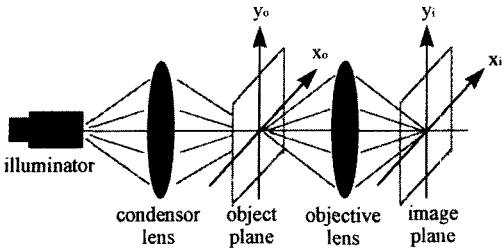


Fig. 2 Optical configuration of imaging system

(condenser)에 의하여 집중되어 측정대상물체를 조명한다. 대물렌즈(objective)는 측정대상물체로부터 방사되는 광속을 집중하여 영상평면에 상(image)을 형성한다. 이때 물체를 조명하는 방법은 여러 가지가 있을 수 있으나 일반적으로 조명의 위치에 따라 동축(coaxial)조명, 배사(backward)조명, 그리고 낙사(circumferential)조명으로 분류한다.

영상광학계의 배율은 표준시편의 치수와 영상처리과정을 통해 측정된 치수를 비교하여 얻어진다. 현미경광학계의 특성상 위와 같이 단순한 비교과정을 통해 배율을 산출하는 방법은 빛의 가간섭성등에 의해 오차를 갖게 된다. 조명의 가간섭성의 정도는 코헤런스에 의해 정의되고, 간섭성이 크면 코헤런트 조명(coherent illumination), 없으면 인코헤런트 조명(Incoherent illumination)이라 한다. 시간적 간섭성을 고려할 경우에는 코헤

런트 조명에서는 레이저, 인코헤런트 조명에서는 할로겐 램프등을 광원으로 사용한다. 공간적 간섭성을 고려하면 할로겐 램프를 사용하여 코헤런트 조명을 구현할 수 있다. Fig.3은 공간적 간섭성에 대해 설명한 것이다. Fig.3(a)는 일반 조명원이 핀홀을 통과한 것이고, 이 경우 코헤런트 조명에 가깝다. Fig.3(b)와 같이 일반 조명원을 측정 대상물에 대하여 거리를 두고 조명을 하면 인코헤런트 조명에 가까워진다. 광학현미경에서의 모든 조명은 부분적인 간섭성을 갖게 되고, 가간섭성의 정도를 식(2)와 같이 집광렌즈의 NA값과 대물렌즈의 NA값의 비  $S$ 로 표현한다.  $S = 0.2$ 이면 인코헤런트 조명,  $S = \infty$ 이면 코헤런트 조명이라 한다.

$$S = \frac{NA_{con}}{NA_{obj}} \tag{2}$$

Fig.3에서와 같이 선패턴을 결상하였을 경우 조명에 대하여 나타나는 선패턴의 강도분포는 Fig.4와 같다. 코헤런트조명을 사용하면 예지에서 강도곡선의 기울기가 매우 급하고, 회절무늬가 발생하고 정에지점의 위치는 임계값 0.25에 해당한다. 인코헤런트조명을 사용할 경우에는 강도곡선의 기울기가 코헤런트 조명에 비하여 완만하고 회절무늬가 발생하지 않는다. 이때 정에지점은 임계값 0.5에 위치한다.

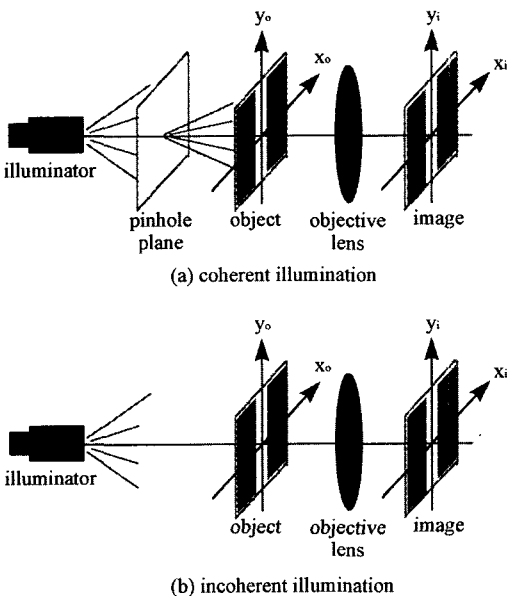


Fig. 3 Type of illumination

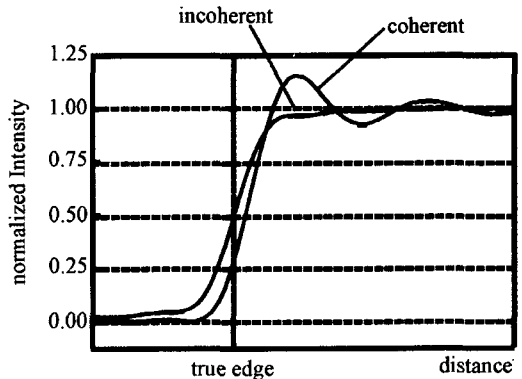


Fig. 4 Edge profile with illumination condition

Fig.4는 측정대상물의 특성을 고려하지 않은 경우이고, 그 특성을 고려하면 예지점의 위치는 변하게 된다. 측정대상물체의 투과도(amplitude transmittance)  $T_0$ 와 상대적인 높이차이에 의한 위상차이값  $\phi_0$ 로 물체의 이상적인 예지모델을 표현하면 식(3)과 같다<sup>(2)</sup>.

$$T(x) = T_0 e^{i\phi_0}, \quad (x \leq 0) \quad (3)$$

$$= 1, \quad (x > 0)$$

식(3)의 에지모델이 현미경광학계를 통하여 영상공간에 맺힌 영상의 강도를 계산하면, 이에 따른 정에지점의 위치값인 임계값은 식(4), (5)와 같이 표현된다. 식(4)는 코헤런트 조명인 경우, 식(5)는 인코헤런트 조명인 경우이다.<sup>(2)</sup>

$$T_c = 0.25(1 + T_0^2 + 2T_0 \cos \phi_0) \quad (4)$$

$$T_c = 0.5(1 + T_0^2) \quad (5)$$

식(4)로부터 코헤런트 조명인 경우에 임계값은 물체의 투과도  $T_0$ 와 위상차이값  $\phi_0$ 에 의해 변함을 알 수 있다.  $T_0$ 인 경우에는 임계값이 0.25로 Fig.4와 같아진다. Fig.5는  $\phi_0 = \pi/2$ 인 경우에  $T_0$  값을 변화시키면서 계산한 강도곡선이다. 그림의 결과에서  $T_0, \phi_0$  값에 따라 에지곡선과 정에지점의 위치도 변함을 알 수 있다. 따라서, 코헤런트 조명인 경우에는 측정대상물체의 특성을

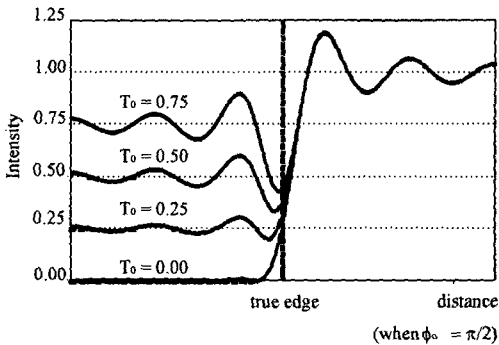


Fig. 5 Edge profile with transmittance and thickness

고려해야 하므로 광학현미경을 이용하여 정확한 에지점을 측정하기가 매우 어려워진다. 부분적인 코헤런트조명을 사용하였을 때에도 에지곡선의 모양과 에지점의 위치가 변화하므로 오차가 발생한다. Fig.6에서와 같이 일반적인 에지검출법을 이용하여 간격을 측정하면 측정값  $V_T$ 와 실제값  $W_M$  사이에 정에지점의 위치가 불확실하여 오차 $\delta$ 가 존재한다. 따라서, 비접촉 좌표측정기의 영상좌표계의 배율교정에서는 CCD센서의 한 화소의 크기과 정에지점의 불확실도에 의한 오차 값인 $\delta$ 의 교정이 필요하다.

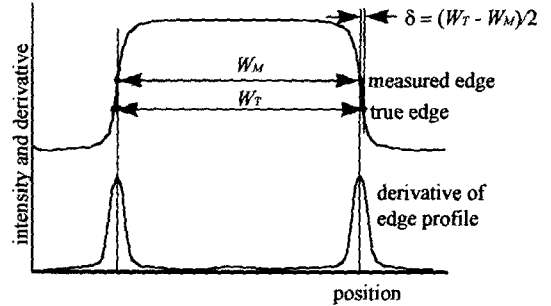


Fig. 6 Edge detection error

비전프로브의 영상좌표계에서는 이상에서 기술한 바와 같이 CCD센서의 한 화소의 크기와 정에지점의 불확실도에 의한 오차  $\delta$  값을 함께 고려하여야 하고, 이는 식(6)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} x_I \\ y_I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{px} & 0 \\ 0 & M_{py} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \end{bmatrix} + \delta \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

식(6)에서  $(x_p, y_p)$ 는 CCD센서의 한 화소에 해당하는 좌표 값이고,  $(M_{px}, M_{py})$ 는 CCD센서의 한 소자의 배율이다. 배율측정은 배율 교정시편을 이용하고,  $\delta$  값은 배율교정 후에 정밀시편을 이용하여 측정한다.

일반적으로 CCD센서의 배율교정을 위한 교정시편은 원형상 또는 선형상을 갖는다. 원형상의 경우 원의 지름을 측정하여 배율교정을 하지만, 가간섭성의 영향을 고려하지 않았기 때문에  $\delta$ 로 인해 배율교정에 오차를 갖는다. 선형상의 경우에는 선사이의 간격을 측정하여 교정하므로 에지검출로 인해 야기되는 문제점은 없지만, x, y 두 축을 독립적으로 교정을 수행해야 하므로 선은 교정축에 수직이 되도록 맞추어야 하는 문제점이 있다. 따라서, 본 논문에서는 이러한 기존의 배율 교정시편의 문제점들을 해결하기 위하여 Fig.7과 같이 사각형의 형상을 갖는 시편을 제작하였다. 먼저, 에지검출을 통하여 사각형의 중심점을 계산하고, 사각형의 중심점들간의 거리를 측정하여 배율 값을 획득한다. 사각형의 중심점을 이용하므로 정에지점의 불확실도에 의한 오차가 없고, 사각형의 각 변의 길이를 계산하므로 동시에 x, y 두 축에 대해 정확히 보정할 수 있다. Fig.7에서와 같이 사각형의 중심점들로부터 측정된 간격  $(\Delta x_p, \Delta y_p)$ , 기울기각도  $(\phi_{xp}, \phi_{yp})$ 로부터 배율교정값  $(M_{px}, M_{py})$ 는 식(7)과 같이 계산된다.

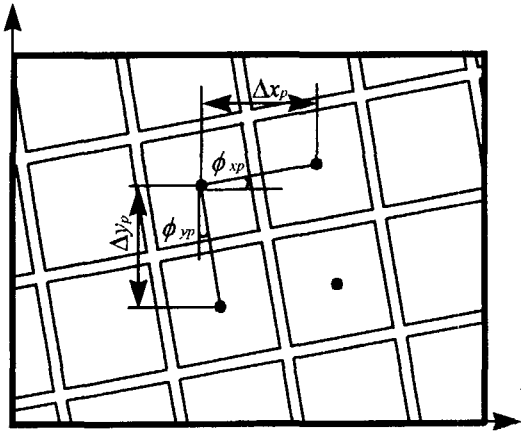


Fig. 7 Calibration target with grids

$$\begin{bmatrix} M_{px} \\ M_{py} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\Delta x_p}{\cos \phi_{xp}} & 0 \\ 0 & \frac{\Delta y_p}{\cos \phi_{yt}} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} D_x \\ D_y \end{bmatrix} \quad (7)$$

식(7)에서  $(D_x, D_y)$ 는 제작한 시편에서 사각형의 중심점간의 실제 거리이다.  $\delta$ 값은 이상에서와 같이 배율교정값  $(M_{px}, M_{py})$ 를 구한 뒤 정밀 교정시편을 측정하여 측정값  $W_M$ 과 실제 거리값  $W_T$ 의 차이 값을 측정하여 얻을 수 있다.

#### 4. 기계 좌표계에 대한 영상 좌표계의 교정

3절에서와 같이 영상좌표계를 교정한 비디오프로브를 비접촉 좌표측정기에 장착하는 경우 정렬오차가 발생하고, 이는 측정성능을 떨어뜨리는 요인이 된다. 따라서, 기계 좌표계에 대한 영상좌표계의 교정작업이 필요하다.

비접촉 좌표측정기에서 기계좌표계를 이상적인 3축 좌표계에 대하여 교정하면 기계 좌표계를 직각이라고 가정할 수 있고, 이에 대한 영상좌표계의 오차는 Fig.8에서와 같다. 식(8)은 보정을 위한 표현이다.

$$\begin{bmatrix} x'_i \\ y'_i \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$= \begin{bmatrix} M_x & 0 \\ 0 & M_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sin \alpha} & -\frac{1}{\tan \alpha} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix}$$

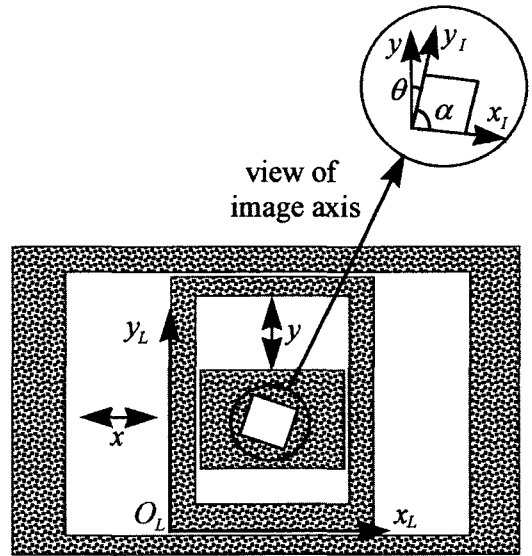


Fig. 8 Angle error between image coordinate and machine coordinate

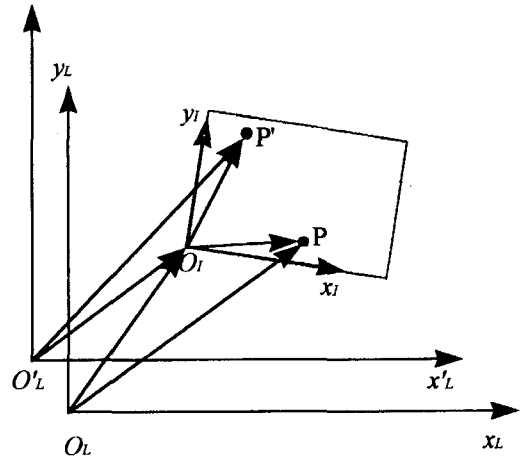


Fig. 9 Calculation method of A matrix by moving stage

$(M_{px}, M_{py})$ 는 영상좌표계와 기계좌표계의 배율 오차값,  $\theta$ 는 영상좌표계와 기계좌표계의 각도오차값, 그리고  $90^\circ - \alpha$ 는 영상좌표계에의 직각도 오차값이다. 따라서, 비접촉 좌표측정기의 측정성능을 향상시키기 위해서는 반드시 식(8)에서 변환행렬 A를 고려하여야 한다. 변환행렬 A는 Fig.9에서와 같이 기계좌표의 임의의 고정점 P는 좌표계의 이동이 있더라도 일정한 좌표값을 가져야 하는 성질을 이용하여 획득한다. Fig.9에서 다음과 같은 성질이 있음을 알 수 있다.

$$\begin{aligned} \vec{O_L P} &= \vec{O_L O_I} + \vec{O_I P} \\ &= \vec{O'_L O'_I} + \vec{O'_I P'} \\ &= \vec{O'_L P'} \end{aligned} \quad (9)$$

식(9)에서 기계 좌표의 고정 점에 대한 벡터  $\vec{O_L P}$ 는 기계이동이 있어도 일정한 값을 가짐을 알 수 있다. 이와 같은 성질을 이용하여 기계이동을 n번 수행하고, 기계이동마다 고정점 P를 측정하면, 식(9)를 식(10)과 같이 표현할 수 있다. 그리고, 식(10)에서 변환행렬 A는 식(11)과 같이 최소자승법으로 획득된다.

$$\vec{x}_T = \vec{x}_L + A^T \vec{x}_I \quad (10)$$

$$A = \{(\vec{x}_T - \vec{x}_L) \vec{x}_I^T (\vec{x}_I \vec{x}_I^T)^{-1}\}^T \quad (11)$$

여기서,

$$\vec{x}_L = \begin{bmatrix} x_{L1} & y_{L1} \\ x_{L2} & y_{L2} \\ \vdots & \vdots \\ x_{Ln} & y_{Ln} \end{bmatrix}, \quad \vec{x}_I = \begin{bmatrix} x_{I1} & y_{I1} \\ x_{I2} & y_{I2} \\ \vdots & \vdots \\ x_{In} & y_{In} \end{bmatrix}$$

식(10)에서 측정값  $\vec{x}_L$ 과  $\vec{x}_I$ 로부터 측정점의 좌표  $\vec{x}_T$ 를 구하려면 변환행렬 A를 알아야 한다. 변환행렬을 구하는 과정은 다음과 같다. 우선 표준시편을 측정테이블위에 놓고 이동하면서 한 점을 n번 관찰하여  $\vec{x}_L$ 과  $\vec{x}_I$ 를 측정한다.  $\vec{x}_T$ 는 고정된 값이므로 다음과 같이 초기값을 정의하여 식(11)에 대입하여 A를 구하고 이를 식(10)에 대입하여  $\vec{x}_T$ 를 구한다. 이러한 과정을  $\vec{x}_T$ 가 수렴할 때 까지 반복하여 A를 산출한다.

$$\begin{bmatrix} x_T \\ y_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_L \\ y_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_x & 0 \\ 0 & M_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_I \\ y_I \end{bmatrix} \quad (12)$$

식(11)로부터 변환행렬 A를 계산하여 기계좌표계에 대한 영상좌표계의 교정을 수행할 수 있다. 변환행렬 A는 이상에서 고려한 바와 같이 비디오프로브의 장착오차등의 값을 교정하는 것이다.

### 5. 실험 결과

실험에서 사용된 비접촉식 좌표측정기는 Fig.10과 같

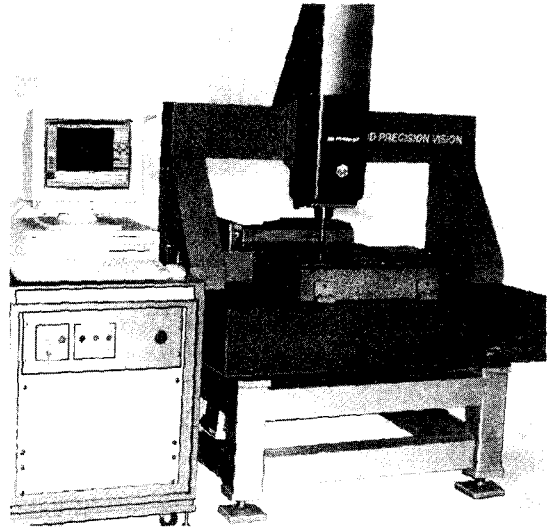


Fig.10 Non-contacting coordinate measuring machine

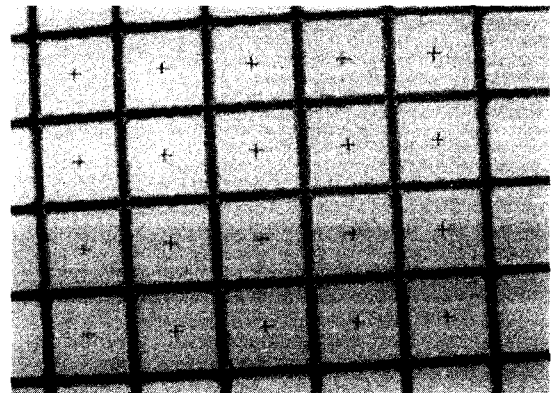


Fig.11 Image processed for calibration

다. 측정을 위한 정밀스테이지는 마이크로 스텝핑모터에 의해 xyz축이 구동되고, 구동의 안내면은 공압베어링을 사용하였다. 구동의 위치검출은 분해능 0.05 $\mu$ m의 리니어 스케일을 이용하였다. 비디오프로브의 배율은 약 20배이다. 배율교정은 영상좌표계의 배율측정, 기계좌표계와 영상좌표계 사이의 배율교정 그리고  $\delta$ 값 교정의 순서로 이루어진다

Fig.11은 영상좌표계의 배율을 교정하기 위해 교정시편의 영상과 영상처리 결과를 보여준다. 10회 반복교정을 수행한 결과, xy축에 대해 각각 1nm, 1.6nm의 반복능을 갖고 약 0.698( $\mu$ m/화소), 0.712( $\mu$ m/화소)의 배율교정값을 얻었다. 영상좌표계의 배율교정을 수행한 후 영상좌표계의  $\delta$ 값 보정은 다음과 같이 수행하였다.  $\delta$ 값

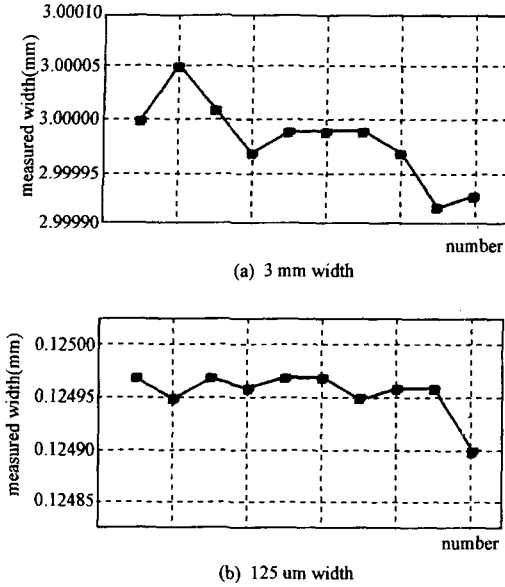


Fig.12 Measurement results of width of gauge blocks

보정을 위하여 3mm 간격의 게이지 블록을 정밀시편으로 이용하였고, 게이지 블록은 0.05 $\mu$ m의 오차를 갖는 것으로 교정받은 것이다. 3mm간격의 게이지블록의 측정결과는 Fig.12(a)와 같다. 이때 측정된  $\delta$ 값은 1.4252 $\mu$ m이다. 3mm간격에서 측정된  $\delta$ 값을 이용하여 125 $\mu$ m의 간격을 측정된 결과는 Fig.12(b)와 같다. 10회 측정의 경우 평균값이 실제 간격에 대하여 0.04 $\mu$ m의 오차를 갖는다.

기계좌표계와 영상좌표계의 교정은 임의의 고정점 P를 이동하면서 변환행렬 A를 획득하여 이루어진다. 실험에서 고정점 P는 125 $\mu$ m의 직경을 갖는 원의 중심점을 이용하였다. 정지상태에서 원의 중심점은 약 0.05 $\mu$ m의 측정 반복능을 가지므로, 매우 안정적이어서 고정점으로 적합하다. Fig.13과 Fig.14는 교정 이전의 값들과 이후의 값들을 비교한 것이다. Fig.13(a)은 행렬 A를 단위 행렬 I로 가정하고 계산한 결과이고, (b)는 실험에서 획득한 변환행렬 A를 고려한 결과이다. A는 식(13)과 같이 표현된다. 교정 이전에는 x, y축에 대해 위치 반복능이 각각 약5.0 $\mu$ m, 7.0 $\mu$ m이었고, 교정 후에는 약 0.18 $\mu$ m, 0.20 $\mu$ m의 값을 얻을 수 있었다.

$$A = \begin{bmatrix} 0.994514 & -0.030565 \\ 0.030452 & 0.990888 \end{bmatrix} \quad (13)$$

영상 좌표계에서  $\delta$ 값을 고려한 보정의 경우 125 $\mu$ m의 간격 측정에서 0.04 $\mu$ m의 오차를 갖고, 기계 좌표계와 영상 좌표계의 교정은 약 0.2 $\mu$ m의 오차를 갖는다.

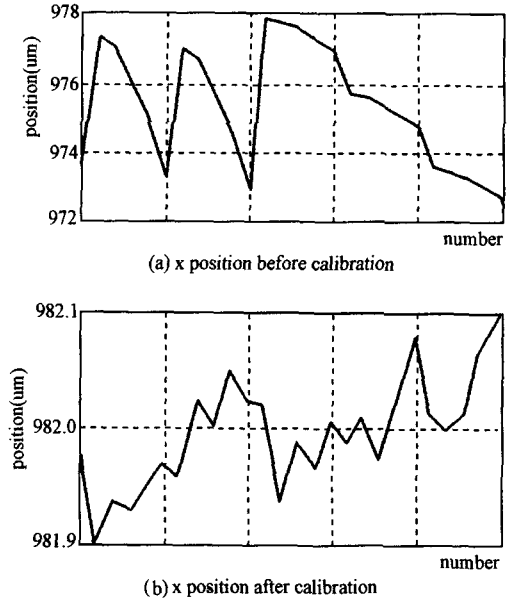


Fig.13 Results of calibration between image coordinate and machine coordinate

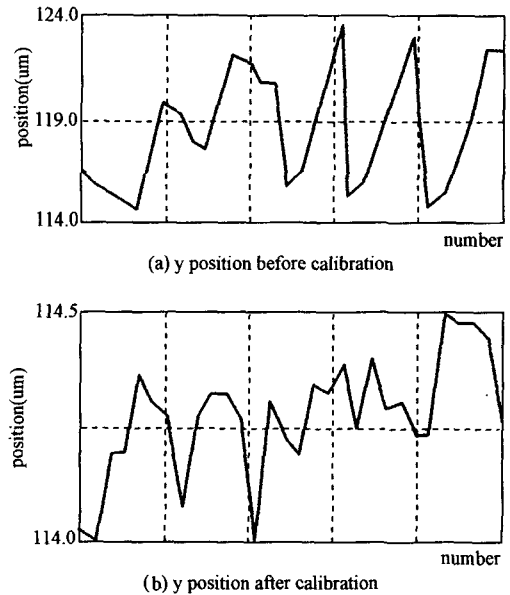


Fig.14 Results of calibration between image coordinate and machine coordinate

## 6. 결 론

비접촉 좌표측정기에서 측정정확도를 향상시키기 위하여 필요한 교정작업은 크게 절대 좌표계에 대한 기계 구동좌표계의 교정, 기계좌표계와 영상좌표계의 교정, 영상좌표계의 배율교정 그리고 영상좌표계의  $\delta$ 값 교정으로 나눌 수 있다. 본 연구에서는 측정 광학계의 조명광의 가간삭성, 측정 대상물의 재료적 성질 등에 의한 에지점의 위치변화를 고찰하였다. 아울러, 에지 검출의 오차를 줄이도록 사각형 형상의 배율 교정 시편을 제작하여 배율 교정을 수행하고, 정밀 게이지 블록을 이용한  $\delta$ 값 교정을 소개하였다. 이와 같은 배율교정과  $\delta$ 값 교정을 통하여  $1.25\mu\text{m}$ 의 간격을  $0.04\mu\text{m}$ 의 오차를 갖는 측정을 할 수 있었다. 또한, 영상 좌표계의 교정 후에 기계 좌표계와의 정렬 오차에 대한 교정으로서, A행렬 값을 실험으로 획득하였다. A행렬을 이용하면 기계 이동이 있을 경우  $0.2\mu\text{m}$ 의 오차를 갖는 측정을 수행할 수 있다.

## 참 고 문 헌

1. Nyssonen, D., "Linewidth measurement with an optical microscope : the effect of operating conditions on the image profile", Applied Optics, Vol. 16, No. 8, pp. 2223-2230, 1977.
2. Nyssonen, D., "Theory of optical edge detection and imaging of thick layers", Optical Society of America, Vol. 72, No. 10, pp. 1425-1436, 1982.
3. Kirk, C. P., "Modeling optical line width measurement techniques in order to improve precision and accuracy", SPIE, Micron and submicron integrated circuit metrology, Vol. 565, pp. 62-70, 1985.
4. Nyssonen, D., "A practical method for edge detection and focusing for line width measurement on wafers", Optical Engineer-

- ing, 26, pp. 81-85, 1987
5. Kirk, C. P., "Aberration effects in an optical measuring microscope", Applied Optics, Vol. 26, No. 16, pp. 3417-3422, 1987.
6. Mechels, S. and Young, M., "Video microscope with sub-micrometer resolution", Applied Optics, Vol. 30, No. 16, pp. 2202-2211, 1991.
7. Baines, J. G. N., "Fiber diameter measurement and their calibration", IEEE Journal of Lightwave Technology, Vol. 8, No. 9, pp.1259-1268, 1990.
8. Young, M., "Optical fiber geometry : accurate measurement of cladding diameter", Journal of Research of N.I.S.T., Vol. 98, No. 2, pp. 203-216, 1993.
9. Goodman, J. W., "Introduction to fourier optics", McGraw-Hill, 1968.
10. Born, M. and Wolf, M., "Principles of optics", Pergamon Press, pp. 491-532, 1989.
11. Gauger, O., "Three dimensional computer vision", MIT Press, pp33-123, 1993.
12. Canny, J., "A computational approach to edge detection", IEEE Transactions of Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. PAMI-8, No. 6, pp. 679-698, 1986
13. Nyssonen, D., Kirk, C. P., "Optical microscope imaging of lines patterned in thick layers with variable edge geometry : theory", J.Opt.Soc.Am.A, Vol. 5, No. 8, pp. 1270-1280, 1988.
14. Alexander, B. F., "Elimination of systematic error in subpixel accuracy centroid method", Optical Engineering, Vol. 30, No. 9, pp. 1320-1330, 1991.