

레이저-수광소자를 이용한 선형 이송축의 기하학적 오차측정 시스템

박희재*, 주종남*, 황상욱**

Geometric Error Assessment System for Linear Guideway using Laser-Photodiodes

Pahk, H. J., Chu, C. N. * (Seoul National University)
Hwang, S. W. ** (Samsung Eletronics)

Abstract

Error assessment and evaluation for machine tool slides have been considered as essential tools for improving accuracy.

In this paper, a computer aided measurement technique is proposed using photo pin diodes of quadrant type and laser source. In the developed system, three photo diodes are mounted on a sensor mounting table, and the sensed signal is processed by specially designed signal conditioner to give fine resolution with minimum noise. A micro computer inputs the processed signal, and the geometric errors of five degree of freedoms are successfully evaluated. Pitch, roll, yaw, vertical and horizontal straightness errors are thus assessed simultaneously for a machine tool slide. Calibration techniques such as optics calibration, photo diode calibration are proposed and implemented, giving precise calibration for the measurement system. The developed system has been applied to a practical machine tool slide, and has been found as one of efficient and precise technique for machine tool slide.

Key words : Geometric error(기하학적 오차), Machine Tool Linear Slide(공작기계선형축), Laser(레이저), Photo Diode(포토아이오우드)

* 서울대학교 기계설계학과

** 삼성전자

1. 머리말

공작기계와 다축기계의 요구되는 정밀도의 사양은 점점 증가하고 있으며, 따라서 설계/가공된 기계요소들의 오차를 측정하고 규명하는 기술도 정밀화/고효율화되어 가고 있다. 특히, 정밀하게 이송하는 기계요소들의 필요성은 정밀기계산업, 전자산업, 반도체 산업 등에서 매우 핵심적이며, 필수적인 기술로서, 그 수요가 급증하는 추세이다. 그러나 일반적으로 이송축의 운동은 기계가공의 오차, 조립에서의 오차 등에 기인하여 여러 자유도의 오차운동을 보이게 된다. 즉, Fig.1에서와 같이 기계축의 오차는 6자유도, 즉 위치오차(positional error), 수평진직도 오차(horizontal straightness error), 수직진직도 오차(vertical straightness error)의 3개의 병진운동 오차성분과 롤(roll), 피치(pitch), 요(yaw)의 3개의 회전운동오차성분이 존재한다. 현재 이송축의 오차를 광전소자를 이용한 공작기계의 이송운동오차의 평가에 대한 연구로서, Weck[1]은 두 개의 광전소자를 이용한 롤 오차의 평가에 대한 연구로서, Hocken[2] 등은 광전소자를 이용한 수평 및 수직방향의 진직도 오차측정방법을 소개하였다. 본 연구에서는 초정밀 공작기계, 반도체 전자장비 등에서 핵심적으로 사용되는 선형 정밀이송축의 5자유도 운동오차를 광전소자와 레이저광원을 이용하여 동시에 측정하는 시스템의 개발을 수행하였다. 이에선 광전소자의 고정기술, 인터페이스 기술, 증폭기설계 기술 등이 함께

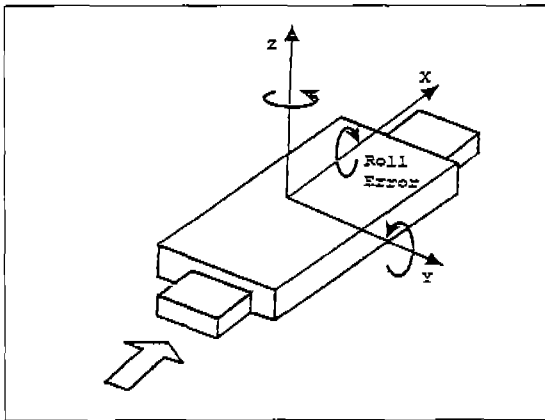


Fig. 1 6자유도 오차요소

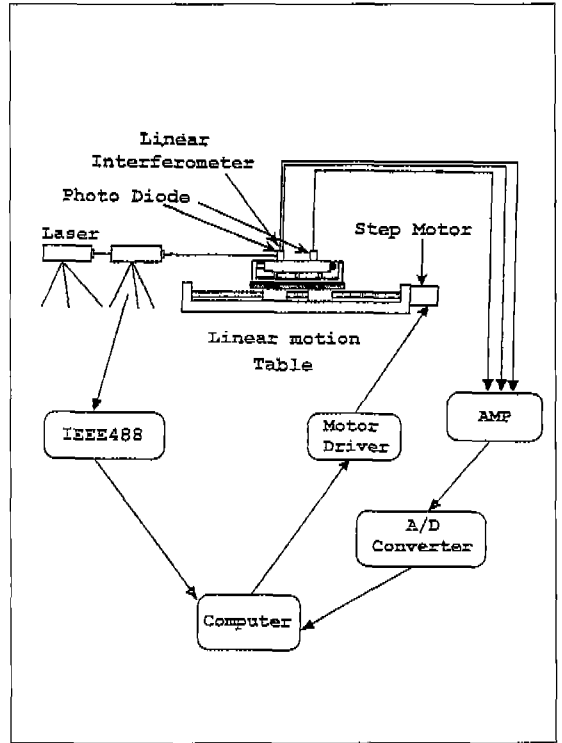


Fig. 2 전체시스템 구성도

고려되어 마이크로프로세서에 의한 정밀한 온라인 측정이 가능하게 되었다.

2 전체시스템의 구성

Fig.2는 전체 측정 시스템의 개략도이다. 본 연구에서는 최대 이송거리가 300mm이고, 펄스마다 10mm의 이송이 가능한 스테핑모터로 구동되는 1축 이송 테이블(X테이블)을 대상으로 하였다. 출력이 2mW인 He-Ne 레이저와 광학기기를 이용하여 광전소자의 광원으로 사용하였고, 수광부인 광전소자는 4분할형(Quadrant Detector)을 채택하였다. 수광소자에서 출력되는 신호는 아날로그-디지털 변환기(A/D converter)를 통하여 컴퓨터로 입력된다. 이러한 데이터는 광전소자의 교정과정에서 구한 변환 행렬을 통하여 실제 좌표계로 대응 변환이 되며, 여기에서 구해진 데이터로부터 1축 이송 시스템의 운동오차를 계산할 수

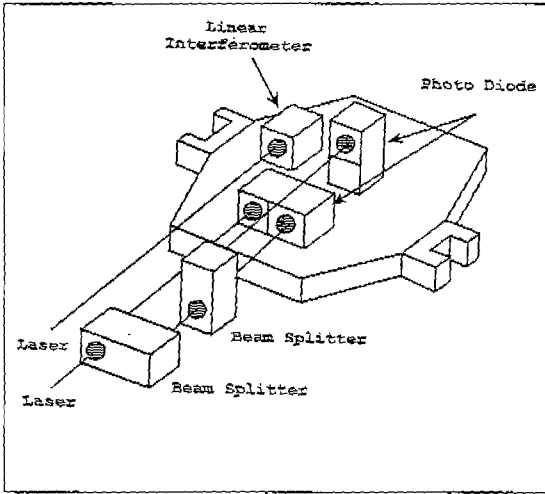


Fig. 3 포토다이오드 센서의 설치

있게 된다. X테이블상에 3개의 4분할형 광전소자를 Fig.3과 같이 설치하여 수평 진직도오차, 수직 진직도 오차 및 롤, 피치, 요오차를 측정할 수 있게 된다. 측정의 정밀도를 구현하기 위해서, 공기 패드형의 방진 테이블 위에 실험장치가 설치되고, 항온시설이 갖추어져서 온도는 20 ± 1 deg.로 유지된다.

광전소자에서 출력되는 전류신호를 전압신호로 변환하고, 증폭하는 증폭기의 회로가 Fig.4에 있다. 광전소자의 각사분면마다 증폭기(OP AMP)를 연결하여 전류-전압변환을 하고, 증폭비를 결정하는 저항의 크기는 레이저광의 세기에 따라 결정한다. 그리고, 사용되는 3개의 광전소자에서 나오는 12개의 변환된 전압신호는 인터페이스 회로를 통해 컴퓨터에 입력된다. 그리고 3개의 광전소자에서 나오는 12개의 전압은 멀티플렉서와 16비트 아날로그-디지털 변환기를 통하여 입력된다.

3. 광전소자 교정

광전소자를 정밀계측에 사용하기 위해서는 다이오드의 출력단의 전압과 실제의 광원의 위치 사이의 관계가 정확하게 규명되어야 한다. Fig.5에서 보인 것처럼 정밀 XY 테이블 위에 포토다이오드를 장치하고, 광원의 움직임을 측정하면서 출력단의 전압을 측정한다.

Fig.6에서 포토다이오드의 4분면으로부터의 출력을 각각 라 하면, 이때 센서상의 좌표(V_x, V_y)는 아래의 식으로부터 계산된다.

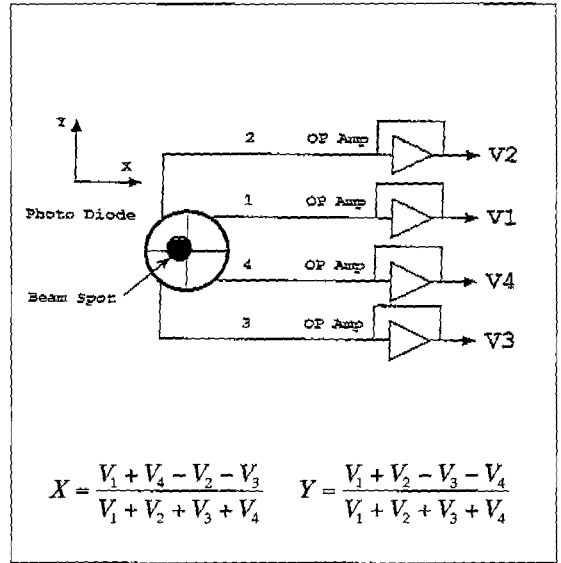


Fig. 4 포토다이오드의 모습과 좌표계산

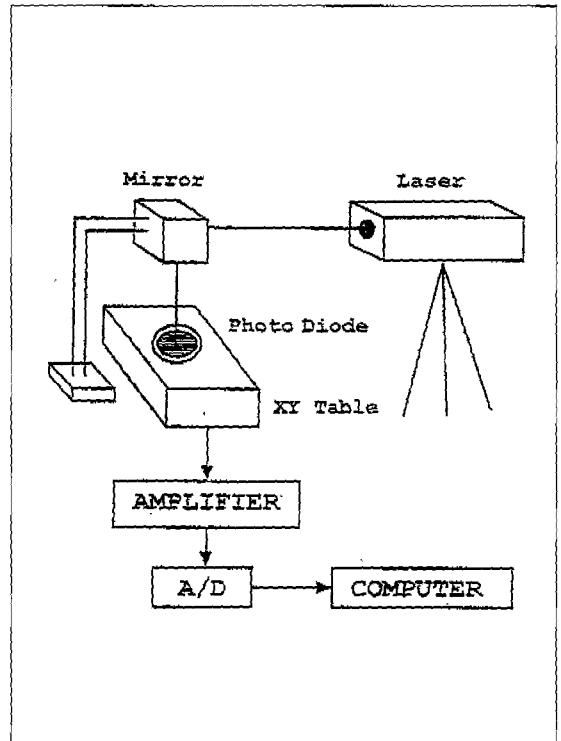


Fig. 6 포토다이오드 칼리브레이션

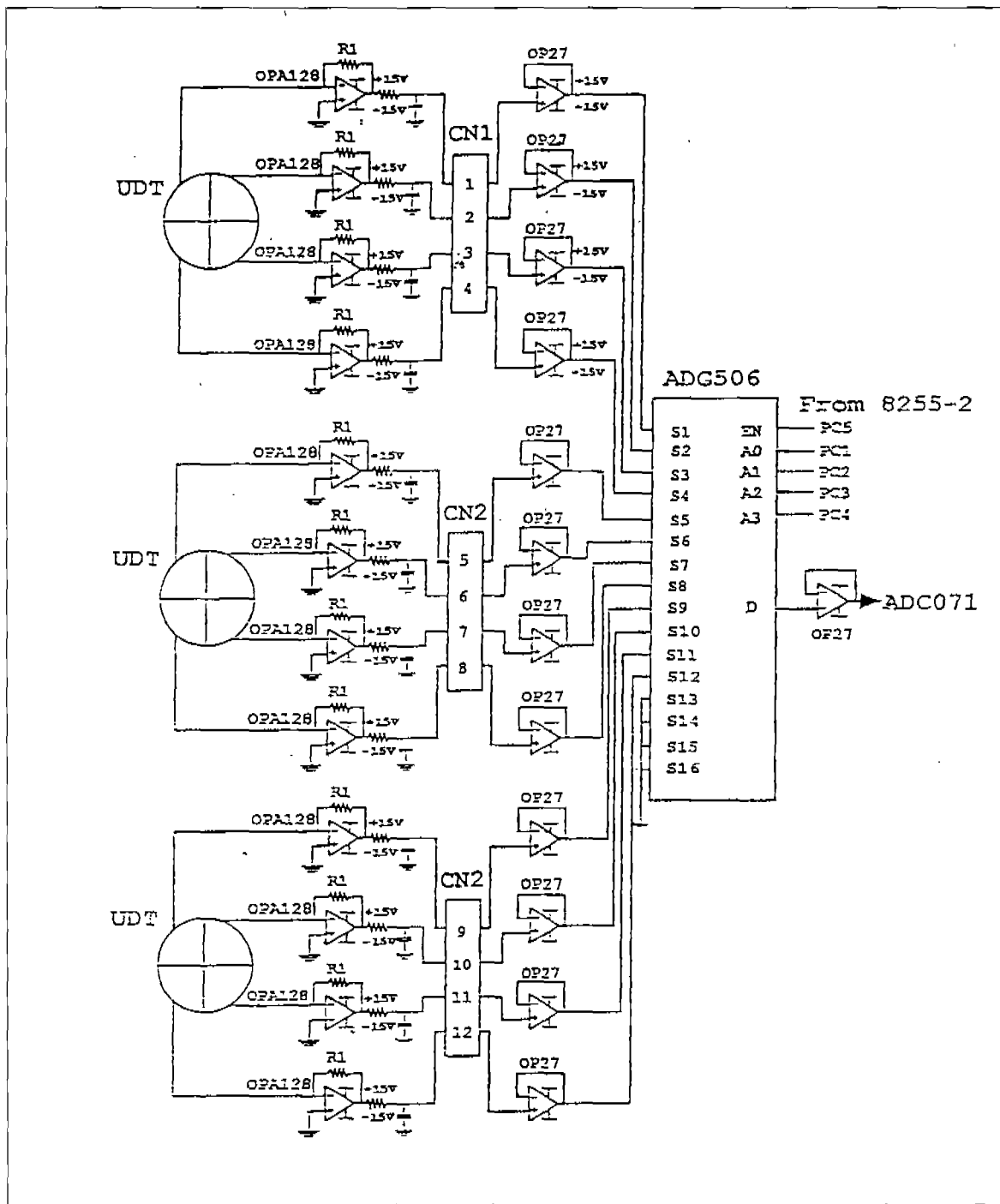


Fig. 5 포토다이오드 증폭기의 회로도

$$V_x = \frac{(V_1 - V_2 - V_3 + V_4)}{(V_1 + V_2 + V_3 + V_4)}$$

$$V_y = \frac{(V_1 + V_2 - V_3 - V_4)}{(V_1 + V_2 + V_3 + V_4)}$$

교정에 사용된 장치의 모습은 Fig.5와 같다. 광원으로 사용된 레이저는 2mW 출력의 He-Ne 레이저이고, 수광부는 광전소자를 이용하고, 광전소자에서 들어오는 신호는 A/D를 통하여 컴퓨터로 입력된다. 그리고 광전소자는 0.5 μ m 정밀도의 XY 테이블을 이용하여 μ m 단위로 이송되면서 교정을 수행한다. 교정의 범위는 양방향 모두 100 μ m이며, 각각 20 μ m의 간격으로 36개의 데이터를 이용하여 교정을 수행하였다.

사용된 광전소자의 비선형성과 각 좌표계의 상호 연관성을 알아보기 위하여 실좌표계와 센서좌표계의 관계를 1차식, 3차식, 5차식으로 모델링하였다.

1차식

$$\begin{aligned} X &= A_0 + A_1V_x + A_2V_y \\ Y &= B_0 + B_1V_y + B_2V_x \end{aligned} \quad (2)$$

3차식

$$\begin{aligned} X &= A_0 + A_1V_x + A_2V_x^2 + A_3V_x^3 \\ &\quad + V_y(A_4 + A_5V_x + A_6V_x^2 + A_7V_x^3) \\ Y &= B_0 + B_1V_y + B_2V_y^2 + B_3V_y^3 \\ &\quad + V_x(B_4 + B_5V_y + B_6V_y^2 + B_7V_y^3) \end{aligned} \quad (3)$$

5차식

$$\begin{aligned} X &= A_0 + A_1V_x + A_2V_x^2 + A_3V_x^3 + A_4V_x^4 + A_5V_x^5 \\ &\quad + V_y(A_6 + A_7V_x + A_8V_x^2 + A_9V_x^3 \\ &\quad + A_{10}V_x^4 + A_{11}V_x^5) \\ Y &= B_0 + B_1V_y + B_2V_y^2 + B_3V_y^3 + B_4V_y^4 + A_5V_y^5 \\ &\quad + V_x(B_6 + B_7V_y + B_8V_y^2 + B_9V_y^3 \\ &\quad + B_{10}V_y^4 + B_{11}V_y^5) \end{aligned} \quad (4)$$

여기에서 (X, Y)는 실좌표이고, (V_x, V_y)는 센서좌표이다. 즉, 각각의 실좌표는 1차, 3차항 및 5차항까지 고려하고, 두 방향간의 정렬오차(Alignment error)에

서 오는 영향은 1차항까지만 고려하였다. 이는 정렬오차는 매우 작으며, 따라서 이의 고차항은 무시할 수 있기 때문이다. 위의 식과 얻어진 데이터에 의한 오차를 최소화하는 계수들을 최소자승법에 의해서 찾는다.

$$\begin{aligned} Error &= \sum E_i \\ &\quad \sum \{(X_i - X)^2 + (Y_i - Y)^2\} \end{aligned} \quad (5)$$

위의 식에서 계수를 찾기 위하여, 아래의 식과 같이 각 계수에 대하여 편미분하여 구한다.

$$\frac{\partial E}{\partial A_1} = 0 \quad (i = 0, \dots, 11) \quad (6)$$

$$\frac{\partial E}{\partial B_1} = 0 \quad (i = 0, \dots, 11) \quad (7)$$

위의 과정을 통하여 얻은 교정의 결과는 다음과 같다.

1차식

$$\begin{aligned} X &= -0.076 + 0.886V_x + 0.017V_y \\ Y &= -0.046 + 0.879V_y + 0.026V_x \end{aligned}$$

3차식

$$\begin{aligned} X &= -0.101 + 1.728V_x - 8.797V_x^2 + 29.156V_x^3 \\ &\quad + V_y(-0.062 + 5.073V_x - 63.831V_x^2 \\ &\quad + 206.825V_x^3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Y &= -0.049 + 1.319V_y - 9.103V_y^2 + 47.368V_y^3 \\ &\quad + V_x(0.012 + 0.401V_y + 4.349V_y^2 \\ &\quad - 62.409V_y^3) \end{aligned}$$

5차식

$$\begin{aligned} X &= -0.131 + 3.438V_x - 41.013V_x^2 + 266.264V_x^3 \\ &\quad - 481.349V_x^4 - 803.328V_x^5 \\ &\quad + V_y(-0.375 + 29.304V_x - 733.106V_x^2 \\ &\quad + 8648.774V_x^3 - 49630.903V_x^4 \\ &\quad + 110517.059V_x^5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Y = & -0.049 + 1.539V_y - 19.527V_y^2 + 186.291V_y^3 \\
 & - 394.258V_y^4 - 1553.659V_y^5 \\
 & + V_x(0.014 - 0.052V_y + 12.911V_y^2 \\
 & + 144.411V_y^3 - 5302.749V_y^4 \\
 & + 27083.919V_y^5)
 \end{aligned}$$

각 차수에 대하여 교정오차의 분포를 보기 위하여 오차의 표준편차를 구하였고, 그 결과는 다음과 같다. 1차의 경우 X방향 2.7 μ m, Y방향 3.1 μ m, 3차의 경우 X방향 1.1 μ m, Y방향 1.4 μ m, 5차의 경우 X방향 0.8 μ m, Y방향 1.3 μ m이다. 위의 결과를 보면 식의 차수가 높아질수록 교정의 오차와 표준편차가 작아지는 것을 볼 수 있으나, 식의 차수가 증가할수록 오차가 누적되고, 증폭될 수 있는 가능성이 크므로, 본 연구에서는 3차의 교정식을 이용하였다. Fig. 7a, b는 3차식으로 된 X축, Y축의 교정곡선을 보이고 있다.

3.2 빔분리기 광학장치 교정

제작된 광전소자 시스템을 공작기계의 이송운동의 오차측정에 사용하기 위해서, 사용하는 빔분리기의 교정을 수행한다. 이는 빔분리기의 오차가 측정의 정도에 영향을 가지기 때문이다. Fig. 8과 같이 광전소자쌍을 XY 테이블 위에 고정시키고, 레이저광이 중앙에 오도록 위치시킨다. 그리고, XY 테이블을 X방향으로 이동시키면서, 각각의 광전소자의 출력을 저장한다. 여기에서 수평방향과 수직방향의 양 방향의 평행도오차가 존재하므로, 두 성분을 모두 고려하여야 한다. 먼저, 수직방향의 평행도오차는 각 광전소자의 수직방향의 좌표의 차를 이송거리 X에 대한 평균직선의 기울기로부터 구해진다. 평행도오차는 이송테이블이 X축을 따라서 움직이면서 발생하는 오차이므로 X에 대한 함수로 나타내

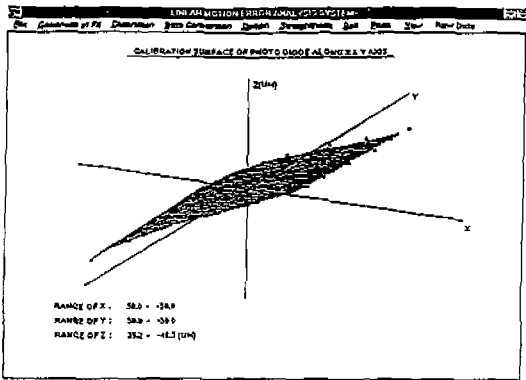


Fig. 7a X축 칼리브레이션 곡선

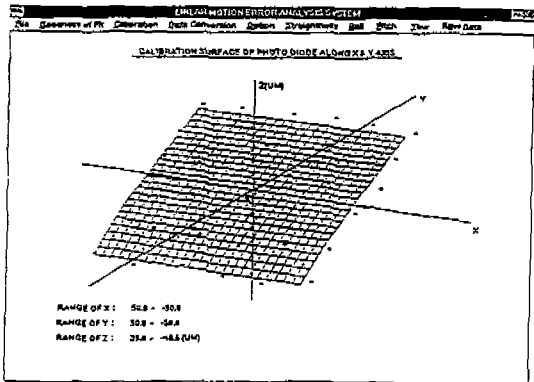


Fig. 7b Y축 칼리브레이션 곡선

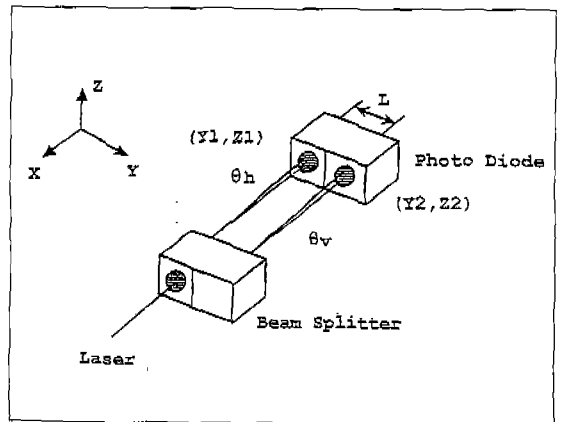


Fig. 8 빔분리기 평행도 오차 칼리브레이션

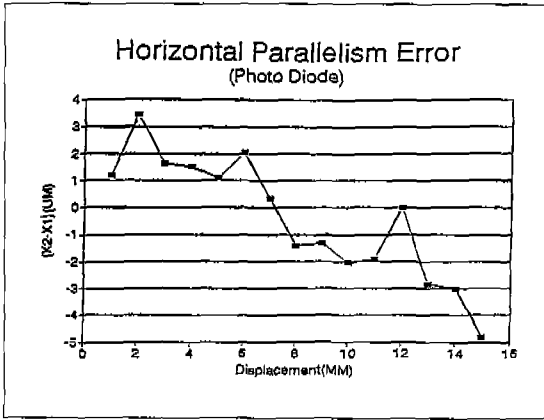


Fig. 9a 수평방향의 평행도 오차

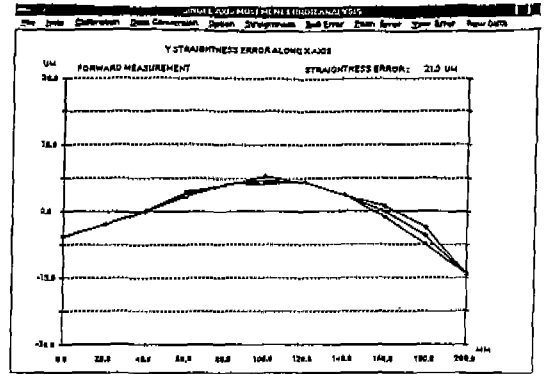


Fig. 10a 수평진직도 오차

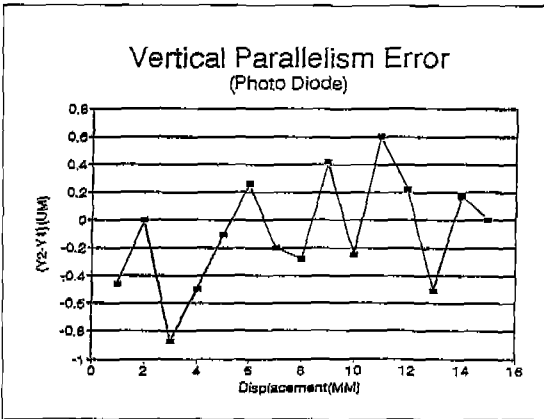


Fig. 9b 수직방향의 평행도 오차

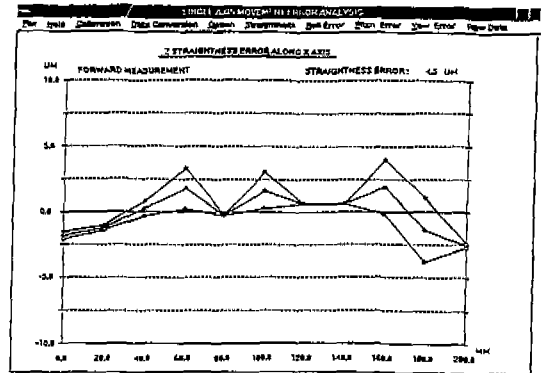


Fig. 10b 수직진직도 오차

진다. 마찬가지로, 수평방향의 평행도오차는 각 광전소자의 수평방향의 좌표의 차를 이송거리 X에 대하여 평균직선의 기울기로부터 얻어지게 된다. 측정결과로서 빔분리기의 수평 평행도오차는 $-0.3652(\mu\text{m}/\text{mm})$ 이고, 수직 평행도오차는 $0.0333(\mu\text{m}/\text{mm})$ 인 것으로 계산되었다. Fig. 9a, 9b는 수평 및 수직 평행도오차 교정의 결과를 보이고 있다.

4. 기하학적 오차의 측정

4.1 수평 진직도오차

Fig. 1에서 보이는 것처럼 수평 진직도오차는 X축으로 테이블 이송시 Y축 방향으로의 병진오차를 의미한다.

다. 광전소자에서 출력된 좌표가 (Y,Z)이고, 기준직선식이 $Y=aX+b$ 라면, 수평 진직도오차(Horizontal Straightness Error)는 다음과 같이 나타내진다.

$$\text{Horizontal Straightness Error} = Y(X) - aX - b \quad (8)$$

Fig. 10a에 수평 진직도오차의 측정결과를 보인다. 진직도오차가 21.3마이크론으로 측정된 예를 보인다.

4.2 수직 진직도오차

Fig. 1에서 보이는 것처럼 수직 진직도오차는 X축으로 테이블 이송시 Z축 방향으로의 병진오차를 의미한다. 광전소자에서 출력된 좌표가 (Y,Z)이고, 기준직선식이 $Y=aX+b$ 라면, 수평 진직도오차(Vertical Straightness Error)는 다음과 같다.

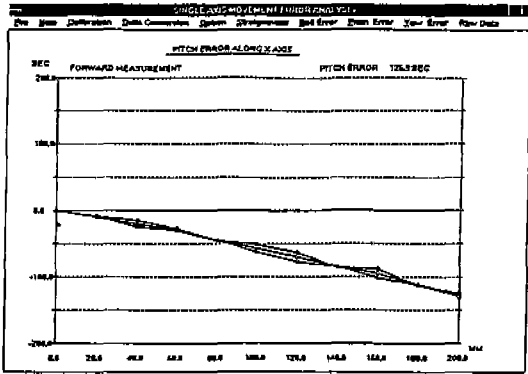


Fig. 10c Roll 오차

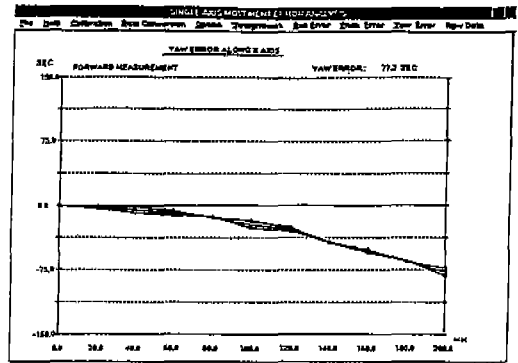


Fig. 10e Yaw 오차

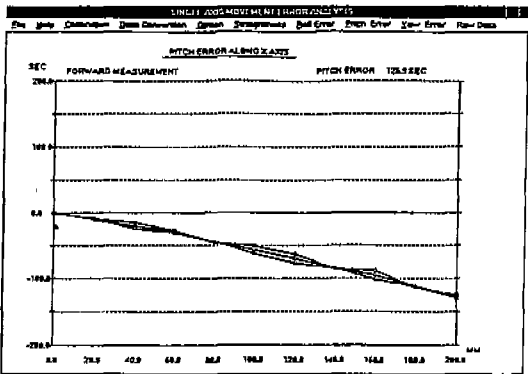


Fig. 10d Pitch 오차

$$\text{Vertical Straightness Error} = Z(X) - aX - b \quad (9)$$

Fig. 10b는 수직 진직도오차의 측정결과를 보이며, 200mm 이송거리에 대해서 4.1 μ m 진직도오차를 보였다.

4.3 롤(Roll)오차

X축으로 테이블 이송시 X축에 의한 각도 오차를 의미한다. 두개의 광전소자에서 출력된 좌표가 (Y1, Z1), (Y2, Z2)이고, 각 광전소자 사이의 거리를 L1, 수직 평행도오차를 이라면, 롤오차(Roll Error)는

다음과 같이 나타내진다.

$$\text{Roll Error} = \frac{Z_{1(x)} - Z_{2(x)} - \theta_1 X}{L_1} \quad (10)$$

Fig. 10c는 롤오차의 측정결과로서, 200mm 이송거리에 대해서 60.2arcsec의 롤오차를 보이고 있다.

4.4 피치(Pitch)오차

X축으로 테이블 이송시 Y축에 의한 회전 오차를 의미한다. 그림7.5와 같이 2개의 광전소자에서 출력된 좌표가 (Y1, Z1), (Y2, Z2)이고, 각 광전소자 사이의 거리를 L2, 수직방향의 평행도오차를 이라 하면, 피치오차(Pitch Error)는 다음과 같이 나타내진다.

$$\text{Pitch Error} = \frac{Z_3(X) - Z_2(X) - \theta_1 X}{L_2} \quad (11)$$

Fig. 10d는 측정된 피치오차를 보이며, 이 경우 피치오차는 126.9arcsec로 나타났다.

4.5 요(Yaw)오차

X축으로 테이블 이송시 Z축에 의한 회전 오차를 의미한다. 그림7.5와 같이 2개의 광전소자 1과 2 사이의 거리를 L1; 2,3 사이의 거리를 L2; 그리고 수평 평행도오차를 라 하면, 요오차(Yaw Error)는 다음과 같

이 나타내진다.

$$\text{Yaw Error} = \frac{Y_2(X) - Y_3(X) + L_1 \times \text{Roll}(X) - \theta_2 X}{L_2} \quad (12)$$

Fig. 10e는 측정된 요오차의 예를 보이고 있으며, 200mm구간에 대해서 77.3arcsec의 값을 얻었다.

측정시스템의 검증을 위해 동일한 기계에 대해서 각각의 오차성분을 레이저 간섭계, 전기레벨 등을 이용하여 측정한 결과 매우 근사한 결과를 얻었다.

5. 결 론

축 이송운동의 오차를 측정할 수 있는 광전소자 측정시스템이 구현되었으며, 결론은 다음과 같다.

(1) 광전소자와 레이저광원을 이용하여 축 이송시에 발생하는 5개의 운동오차를 동시에 검출하는 측정방법이 개발되었다. 개발된 측정방법에 의한 측정결과는 레이저간섭기, 정밀레벨 등의 측정치와 비교하여 매우 근사함을 보였다.

(2) 광전소자에 대한 교정이 수행되었으며, 비선형성을 고려할 때 더욱 정밀한 측정값을 얻을 수 있었다.

(3) 레이저간섭기 등에 의해서 측정이 어려운 롤오차의 측정방법을 구현하였으며, 이때 빔분리기의 오차를 교정하는 방법을 제시하고, 이 경우에 정밀한 측정값을 구할 수 있었다.

(4) 광전소자 측정시스템을 마이크로 컴퓨터와 연계함으로써 종래의 측정방법보다도 매우 빠르며, 정밀한

측정시스템을 구현하였다.

후 기

본 연구는 1993년 한국과학재단의 특정기초연구비(92-1321) 지원으로 이루어진 연구임을 밝힌다.

참고문헌

1. Aoyama, H., Shimokobe, A., "Development of a High Precision Straight Motion System", Bull. Japan. Soc. of prec. Eng. Vol 21, No. 2, 1987
2. Taniguchi, M., Ikeda, M., Inagaki, A., and Funatsu, R., "Ultra Precision Wafer Positioning by 6 axis micro motion mechanism", Int. J. JSPE, Vol 26, No. 1, 1992
3. Draft Standard methods for performance Evaluation of Computer Numerically Controlled Machining Centers, ANSI/ASME B5.54-1991
4. Weck, M., Handbook of Machine Tools, Vol. 4, Metrological Analysis and Performance Test, John & Wiley, 1980
5. 5526A Laser Measurement System, Hewlett Packard Co.