

레이저 및 광전소자를 이용한 공작기계 가이드 운동오차 측정시스템 개발

박 회 재

Development of Geometric Error Measurement System for Machine Tool Guideways Using Laser-Photo Diode

Heuijae Pakh



- 박회재 (서울대학교 기계설계학과)
- 1961년생
- 공작기계 및 측정기의 정밀도측정 시스템 개발을 전공하였으며, 측정공학, 정밀공학, 메카트로닉스 등에 관심을 가지고 있다.

1. 머리말

공작기계와 다축기계에 요구되는 정밀도의 사양은 점점 증가하고 있으며, 따라서 설계·가공된 기계요소의 오차를 측정하고 규명하는 기술도 정밀화·고효율화 되어가고 있다. 특히, 정밀하게 이송하는 기계요소의 필요성은 정밀기계산업, 전자산업, 반도체산업 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, 그림 1에서와 같이 기계축의 오차는 6자유도, 즉, 위치오차, 수평진직도오차, 수직진직도오차의 3개의 병진운동 오차성분과 롤(roll), 피치(pitch), 요(yaw)의 3개의 회전운동 오차성분이 존재한다. 따라서 정밀 이송운동을 구현하기 위해서는 두 가지 방향의 노력,

즉, 기계요소를 정밀하게 가공·조립하는 기술과 아울러, 이송운동 중에 여전히 잔류하는 오차를 측정하고 수정해주는 기술이 필요하게 된다. 본 연구에서는 초정밀 공작기계, 반도체 전자장비 등에서 핵심적으로 사용되는 선형 정밀이송축의 운동오차를 이송운동

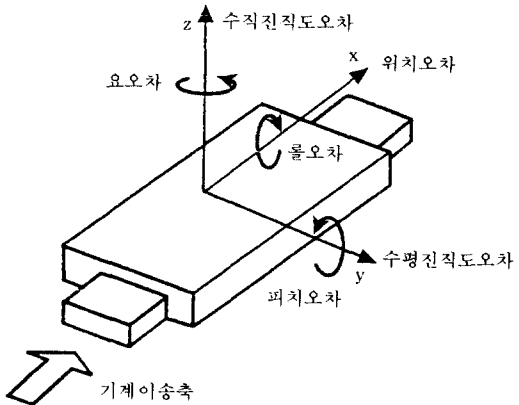


그림 1 6자유도 오차요소

중 실시간에서 정밀하게 측정하고, 보정하는 시스템을 개발함에 있다. 특히 운동오차측정과 관련해서는 광전센서와 레이저 광을 이용하여 5자유도의 오차를 정확하게 측정할 수 있는 시스템이 제안되었는데, 이같은 실시간에서 운동오차를 측정하는 시스템의 개발에 관한 것이다.

2. 전체 시스템의 구성

그림 2는 전체시스템의 개략도이다. 본 연구에서는 최대 이송거리가 300 mm이고, 펄스(pulse)마다 10 μ m의 이송이 가능한 스테핑모터로 구동되는 X 테이블을 대상으로 하였다. 출력이 2 mW인 2개의 He-Ne 레이저와 광학기기를 이용하여 포토 다이오드의 광원으로 사용하였고, 수광부인 포토 다이오드는 United Detector Technology의 4분할형 포토 다이오드(Quadrant Detector)를 채택하였다. 포토 다이오드에서 출력되는 신호는 A/D 변환기를 통하여 컴퓨터로 입력된다. 이러한 데이터는 포토 다이오드의 캘리브레이션 과정에서 구한 변환 행렬을 통하여 실좌표계로 대응 변환이 되고, 여기에서 구해

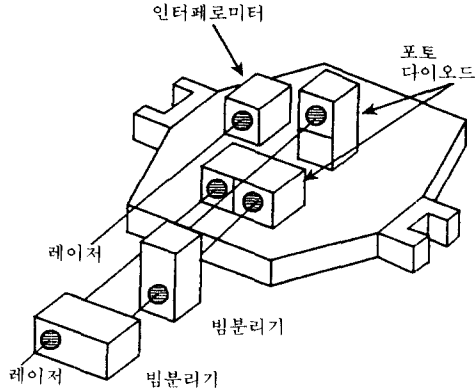


그림 3 포토다이오드 센서의 설치

진 데이터로부터 실험의 대상으로 한 단축 이송 시스템의 운동오차를 계산할 수 있게 된다. X 테이블의 위에 3개의 4분할형 포토 다이오드를 그림 3과 같이 설치하여 수평진직도오차, 수직진직도오차 및 롤, 피치, 요 오차를 측정할 수 있게 된다. 그리고 실험조건은 공기 패드형의 방진 테이블 위에 실험장치가 설치되고, 항온시설이 갖추어져서 온도는 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 로 유지된다.

2.1 광전소자의 특징 및 작동원리

포토 다이오드는 빛에 의한 자기기전력을 이용하므로 소자에 대한 바이어스가 불필요하다. 분광감도 특성은 짧은 파장 영역에서 긴 파장 영역까지 사용이 가능하다. 포토 다이오드의 일반적 특징은 다음과 같다.

- (1) 입사 광량-출력 전류의 직선성이 우수하다.
- (2) 고속의 응답성을 가진다.
- (3) 온도에 대한 특성변화가 작다.
- (4) 신뢰성이 높다.
- (5) 빛이 없는 상태에서 흐르는 전류가 적다.

이상적 포토 다이오드는 전류소스로 볼 수 있으며, 입사되는 빛이 없으면 다이오드와 같은 역할을 한다.

포토 다이오드는 빛으로 조절되는 전류소

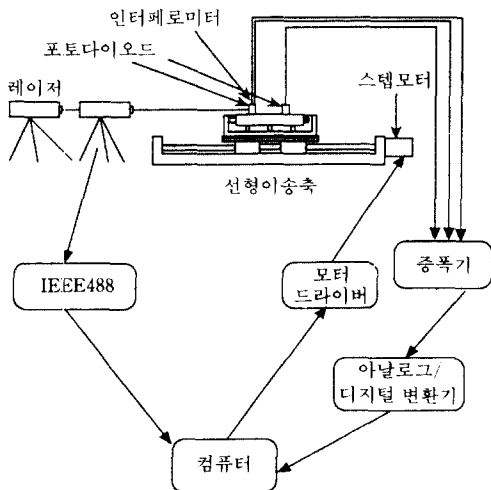


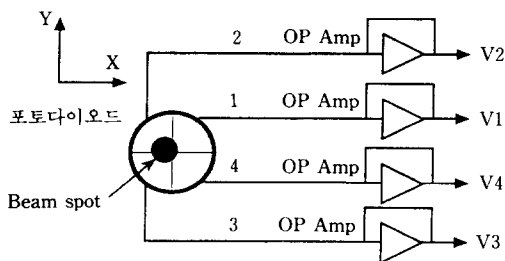
그림 2 전체시스템 구성도

스(photo-controlled current source)와 반도체 다이오드가 병렬로 연결된 것과 동등하게 반응한다.

미시적으로 살펴보면 이산적으로 떨어져 있는 에너지 준위가 있어 전자가 그 에너지 준위를 메우고 있으며, 이 에너지 준위에는 전도대와 비전도대가 있다. 전도대와 비전도대 사이에는 일정한 에너지 차이가 존재하여 비전도대의 전자가 전도대로 이동하기 위해서는 외부로부터의 에너지가 필요하다.

빛은 일종의 에너지이며, 그 크기는 $E = h\nu$ (h : 플랑크 상수, ν : 빛의 주파수)로 나타낼 수 있다.

광자 에너지가 반도체에 흡수되면 비전도대에 존재하는 전자가 에너지를 공급받아 전도대로 이동할 수 있게 된다. 그러나 광자에너지가 전도대와 비전도대의 에너지 차이보다 작으면 전자는 이동하지 못한다. 전도대와 비전도대의 에너지 차이는 원자마다 고유한 값을 가지므로 특정 주파수의 빛에 대해 더 효과적으로 반응하게 된다. 포토 다이오드는 이 광기전력현상을 이용한 것으로 포토 다이오드의 PN접합에 빛이 입사될 때 생기는 전류를 이용하는 것이다. 4분할형 포토 다이오드 센서는 수광부에 빛을 받으면, 각 4분면은 빛의 세기에 비례하는 전류를 출력



$$X = \frac{V1 + V4 - V2 - V3}{V1 + V2 + V3 + V4}$$

$$Y = \frac{V1 + V2 - V3 - V4}{V1 + V2 + V3 + V4}$$

그림 4 포토다이오드의 모습과 좌표계산

하게 된다. 그림 4는 포토 다이오드 센서와 좌표계산을 보이고 있다.

2.2 레이저

레이저(Laser)는 “Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation”의 약어로서, 주파수, 위상, 방향성, 편향성 등의 성질이 동일한 강한 빛을 발생하는 빛의 증폭기이며, 밝음(brightness), 단색성(monochromaticity), 직진성(unidirectionality), 일관성(coherence)의 특징을 가진다.

본 실험에서는 He-Ne 레이저를 광원으로 사용하였으며, 파장의 길이가 632.8 nm이고, 레이저의 출력은 2mW, 빔의 지름은 6 mm이다.

2.3 광전소자 증폭기

포토 다이오드 센서에서 출력되는 전류신호를 다루기 용이한 전압신호로 변환시키고, 전압신호에서 다시 필요한 신호성분만을 골라내는 작업이 필요하다.

그림 5는 포토 다이오드 증폭기의 회로도이다. 포토 다이오드의 각 4분면마다 증폭기(OP AMP)를 연결하여 전류-전압변환을 하고, 증폭비를 결정하는 저항의 크기는 레이저 광의 세기에 따라 결정한다. 그리고 사용되는 3개의 포토 다이오드에서 나오는 12개의 변환된 전압신호는 인터페이스를 통해 컴퓨터에 입력된다.

전압-전류변환회로에서는 전류를 전압으로 변환하는 역할을 수행하며 그림 5에 표시된 OPA128이 관계된 회로이다. 포토 다이오드 센서로부터 i 의 전류가 증폭기에 전달되면 $V = -i \times R$ 의 전압신호가 나온다. 실제 회로에서는 270 k ohm의 저항을 사용하였고 따라서 270배 증폭된 전압신호로 바뀌어 나온다.

저항 R 과 병렬로 연결되어 있는 커패시턴스 C 는 용량 $1 \mu F$ 의 크기를 가지며 커패시턴스 C 를 병렬로 결합함으로써 노이즈에 대

한 증가폭을 줄일 수 있다. 포토 다이오드 센서의 동작영역이 DC주파수대에 가까우므로 고주파성분의 노이즈를 제거하는 역할을 한다.

포토 다이오드의 각 4분면마다 증폭기인 OPA128을 사용하였고, 증폭비는 레이저의 세기에 따라서 결정된다. 그리고, 3개의 포토 다이오드에서 나오는 12개의 전압은 멀티

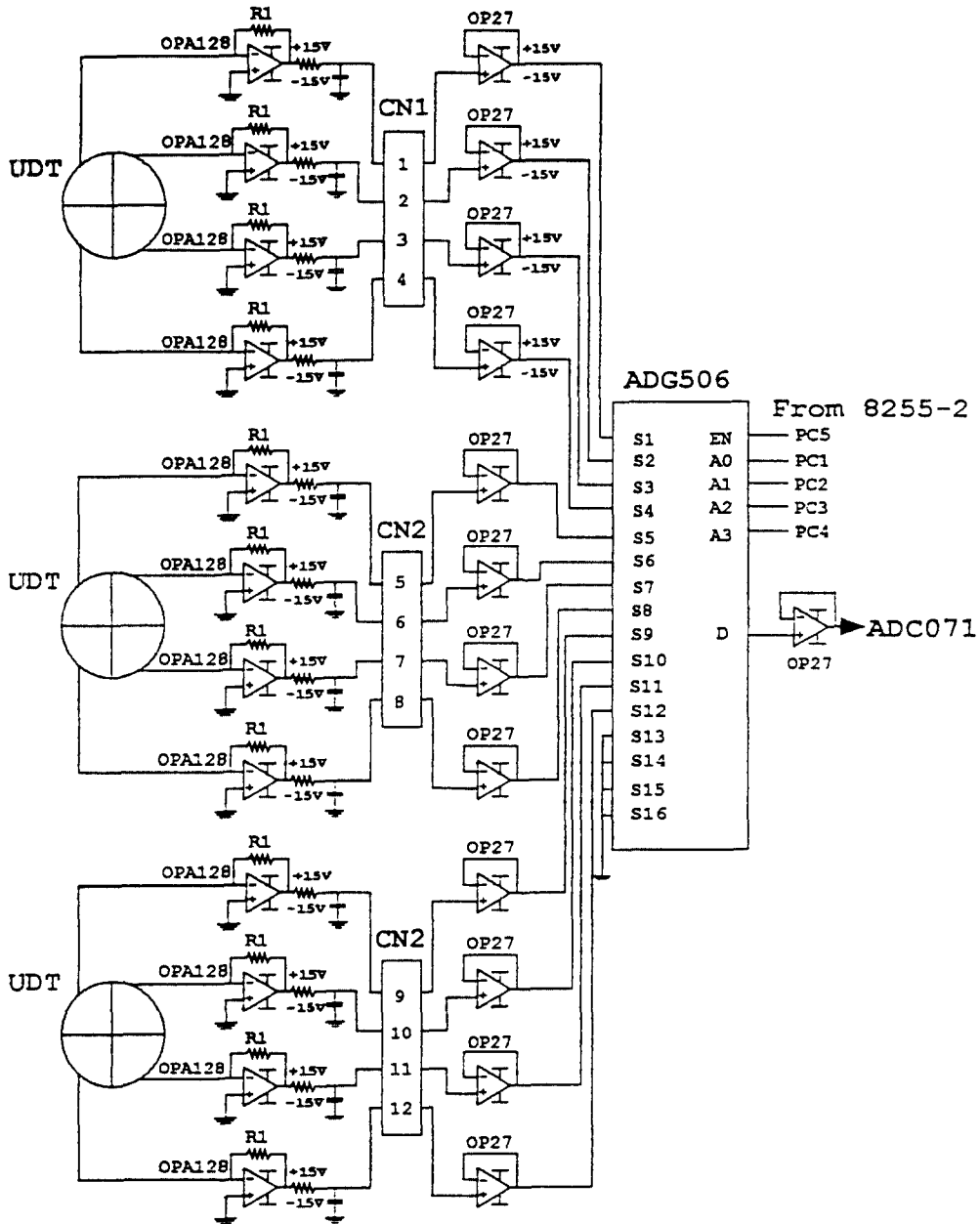


그림 5 포토다이오드 증폭기의 회로도

플렉서인 ADG506을 통하여 16비트 A/D 변환기인 ADC071로 연결되며, 증폭기는 8255로 컨트롤이 된다.

3. 광전소자 칼리브레이션

본 실험에서는 2차원-칼리브레이션이 사용되었으며, 이것은 XY레이블에 의하여 얻어지는 실좌표와 포토 다이오드로부터 얻어진 좌표(센서 좌표계)를 대응시키는 과정이다. 그림 6은 칼리브레이션 장치를 보이고 있다. 포토 다이오드의 4분면으로부터의 출력을 각각 V_1, V_2, V_3, V_4 라 하면, 이때 센서상의 좌표는 아래의 식으로부터 계산된다.

$$\begin{aligned} V_x &= \frac{(V_1 - V_2 - V_3 + V_4)}{(V_1 + V_2 + V_3 + V_4)} \\ V_y &= \frac{(V_1 + V_2 - V_3 - V_4)}{(V_1 + V_2 + V_3 + V_4)} \end{aligned} \quad (1)$$

사용된 포토 다이오드의 비선형성과 각 좌표계의 상호 연관성을 알아보기 위하여 실좌표계와 센서좌표계의 관계를 1차식, 3차식, 5차식으로 나타내어 실험하였다.

○1차식

$$\begin{aligned} X &= A_0 + A_1 V_x + A_2 V_y \\ Y &= B_0 + B_1 V_y + B_2 V_x \end{aligned}$$

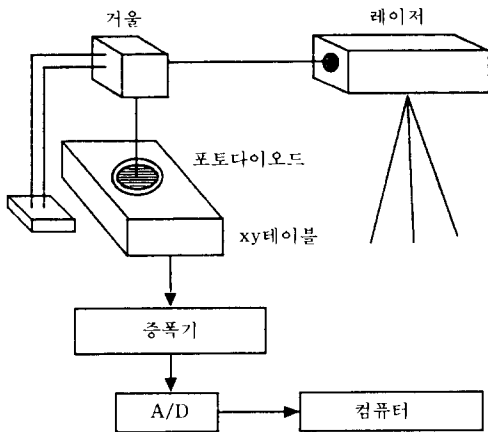


그림 6 포토다이오드 칼리브레이션

○3차식

$$\begin{aligned} X &= A_0 + A_1 V_x + A_2 V_x^2 + A_3 V_x^3 \\ &\quad + V_y(A_4 + A_5 V_x + A_6 V_x^2 + A_7 V_x^3) \\ Y &= B_0 + B_1 V_y + B_2 V_y^2 + B_3 V_y^3 \\ &\quad + V_x(B_4 + B_5 V_y + B_6 V_y^2 + B_7 V_y^3) \end{aligned}$$

○5차식

$$\begin{aligned} X &= A_0 + A_1 V_x + A_2 V_x^2 + A_3 V_x^3 + A_4 V_x^4 \\ &\quad + A_5 V_x^5 + V_y(A_6 + A_7 V_x + A_8 V_x^2 + A_9 V_x^3 \\ &\quad + A_{10} V_x^4 + A_{11} V_x^5) \\ Y &= B_0 + B_1 V_y + B_2 V_y^2 + B_3 V_y^3 + B_4 V_y^4 + B_5 V_y^5 \\ &\quad + V_x(B_6 + B_7 V_y + B_8 V_y^2 + B_9 V_y^3 + B_{10} V_y^4 \\ &\quad + B_{11} V_y^5) \end{aligned}$$

여기서, (X, Y) 는 실좌표이고, (V_x, V_y) 는 센서좌표이다. 즉, 각각의 실좌표는 1차, 3차항 및 5차항까지 고려하고, 두 방향간의 정렬편차에 오는 영향은 1차항까지만 고려하였다. 이는 정렬편차는 매우 작으므로 이의 고차항은 무시할 수 있기 때문이다. 위의 식과 얻어진 데이터에 의한 오차를 최소화하는 계수들을 최소자승법에 의해서 찾는다.

(X_i, Y_i) 를 측정된 실좌표 (X, Y) 를 센서좌표에서 계산된 좌표라 할 때 아래식과 같다.

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

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

$$\frac{\partial E}{\partial A_i} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial E}{\partial B_i} = 0 \quad (4)$$

위의 과정을 통하여 얻은 칼리브레이션 결과는 다음과 같다.

○1차식

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

○3차식

$$X = -0.101 + 1.728 V_x - 8.797 V_x^2 + 29.156 V_x^3$$

$$+V_y(-0.062+5.073V_x-63.831V_x^2+206.825V_x^3)$$

$$Y = -0.049+1.319V_y-9.103V_y^2+47.368V_y^3+V_x(0.012+0.401V_y+4.349V_y^2-62.490V_y^3)$$

○5차식

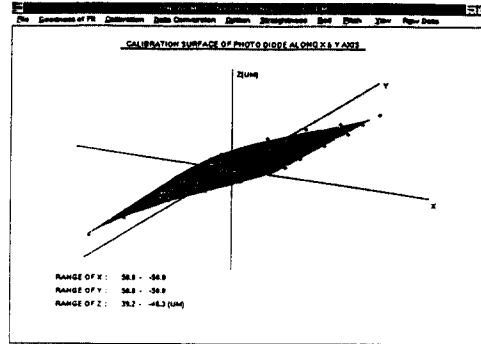
$$X = -0.131+3.438V_x-41.013V_x^2+266.264V_x^3-481.349V_x^4-803.328V_x^5+V_y(-0.375+29.304V_x-733.106V_x^2+8648.774V_x^3-49630.903V_x^4+110517.059V_x^5)$$

$$Y = -0.049+1.539V_y-19.527V_y^2+186.291V_y^3-394.258V_y^4-1553.659V_y^5+V_x(0.014-0.052V_y+12.911V_y^2+144.411V_y^3-5302.749V_y^4+27083.919V_y^5)$$

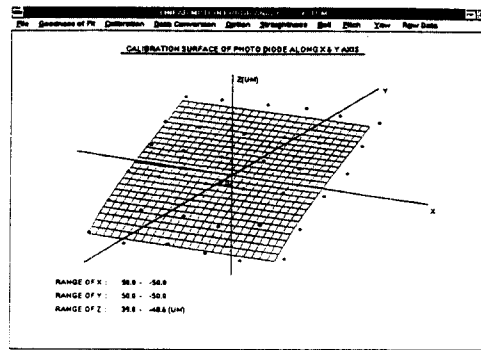
각 차수에 대하여 칼리브레이션 오차의 분포를 보기 위하여 오차의 표준편차를 구하였고, 그 결과는 다음과 같다. 1차의 경우 X방향 2.7 μm, Y방향 3.1 μm, 3차의 경우 X방향 1.1 μm, Y방향 1.4 μm, 5차의 경우 X방향 0.8 μm, Y방향 1.3 μm이다. 위의 결과를 보면 식의 차수가 높아질수록 칼리브레이션의 오차와 표준편차가 작아지는 것을 볼 수 있으나, 식의 차수가 증가할수록 오차가 누적되고, 증폭될 수 있는 가능성이 크므로, 본 연구에서는 3차의 칼리브레이션 식을 이용하였다. 그림 7(a), (b)는 3차식으로 된 X축, Y축의 칼리브레이션 곡선을 보이고 있다.

3.1 옵틱스 칼리브레이션

제작된 광전소자 시스템을 공작기계의 이송운동의 오차측정에 사용하기 위해서, 사용하는 옵틱스(빔분리기)의 칼리브레이션을 수행한다. 그림 8과 같이 포토 다이오드쌍을 XY테이블 위에 고정시키고, 레이저광이 중앙에 오도록 위치시킨다. 그리고 XY테이블을 X방향으로 이동시키면서, 각각의 포토



(a) X축



(b) Y축

그림 7 칼리브레이션 곡선

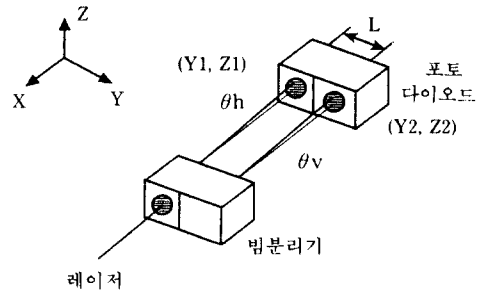
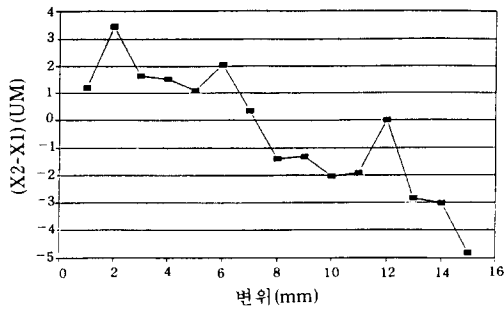
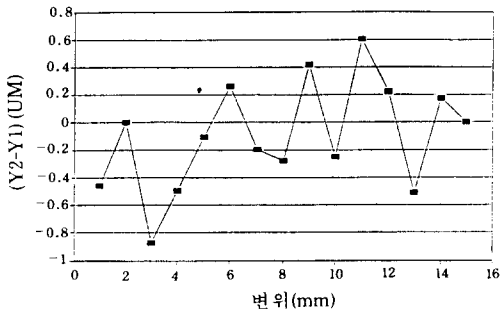


그림 8 빔분리기 평행도 오차 칼리브레이션

다이오드의 출력을 저장한다. 여기에서 수평방향과 수직방향의 양 방향의 평행도오차가 존재하므로, 두 성분을 모두 고려하여야 한다. 먼저, 수직방향의 평행도오차는 각 포토다이오드의 수직방향 좌표의 차를 이송거리 X에 대하여 최소자승직선을 구할 때 이 직



(a) 수평방향



(b) 수직방향

그림 9 평행도오차의 측정결과

선의 기울기이다. 평행도오차는 이송테이블이 X축을 따라서 움직이면서 발행하는 오차이므로 X에 대한 함수로 나타내진다. 마찬가지로, 수평방향의 평행도오차는 각 포토다이오드의 수평방향의 좌표의 차를 이송거리 X에 대하여 최소사승곡선을 구할 때, 이 직선의 기울기이다. 측정결과로서 옵틱스(빔분리기)의 수평평행도오차는 $-0.3652(\mu\text{m}/\text{mm})$ 이고, 수직평행도오차는 $0.0333(\mu\text{m}/\text{mm})$ 인 것으로 계산되었다. 그림 9(a), (b)는 수평방향 및 수직방향의 평행도 오차의 측정결과를 나타내고 있다.

4. 운동오차측정 시스템

4.1 수평진직도오차

그림 1에서 수평진직도오차는 X축으로 테이블 이송시 Y축 방향으로의 병진오차를 의

미한다. 포토 다이오드에서 출력된 좌표가 (Y, Z) 이고, 기준직선식이 $Y=aX+B$ 라면, 수평진직도오차는 다음과 같이 나타내진다.

$$\text{수평진직도오차} = Y(X) - aX - b \quad (5)$$

4.2 수직진직도오차

그림 1에서 수직진직도오차는 X축으로 테이블 이송시 Z축 방향으로의 병진오차를 의미한다. 포토 다이오드에서 출력된 좌표가 (Y, Z) 이고, 기준직선식이 $Y=aX+b$ 라면, 수직진직도오차는 다음과 같다.

$$\text{수직진직도오차} = Z(X) - aX - b \quad (6)$$

4.3 롤오차

X축으로 테이블이송시 X축에 의한 각도오차를 의미한다. 두 개의 포토 다이오드에서 출력된 좌표가 (Y_1, Z_1) , (Y_2, Z_2) 이고, 각 포토 다이오드 사이의 거리를 L_1 , 수직평행도오차를 θ_1 이라하면, 롤(Roll)오차는 다음과 같이 나타내진다.

$$\text{롤오차} = \frac{[Z_1(x) - Z_2(x) - \theta_1 X]}{L_1} \quad (7)$$

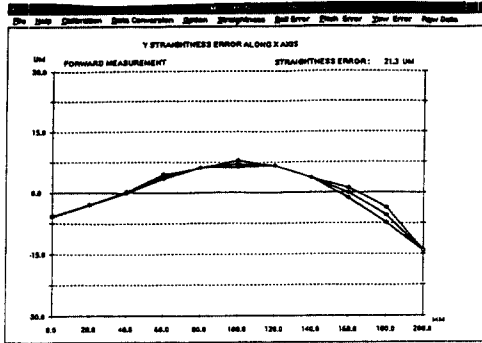
4.4 피치오차

X축으로 테이블이송시 Y축에 의한 회전오차를 의미한다. 그림 3과 같이 두 개의 포토 다이오드에서 출력된 좌표가 (Y_1, Z_1) , (Y_2, Z_2) 이고, 각 포토 다이오드 사이의 거리를 L_2 , 수직방향의 평행도오차를 θ_2 이라하면, 피치(pitch)오차는 다음과 같이 나타내진다.

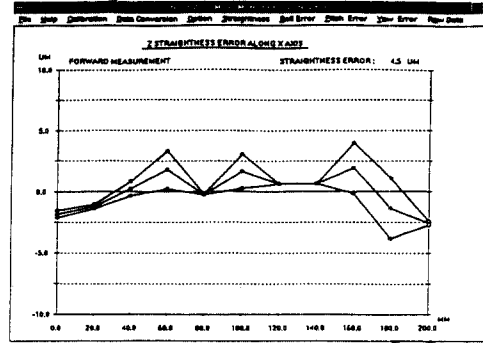
$$\text{피치오차} = \frac{(Z_3(X) - Z_2(X) - \theta_2 X)}{L_2} \quad (8)$$

4.5 요오차

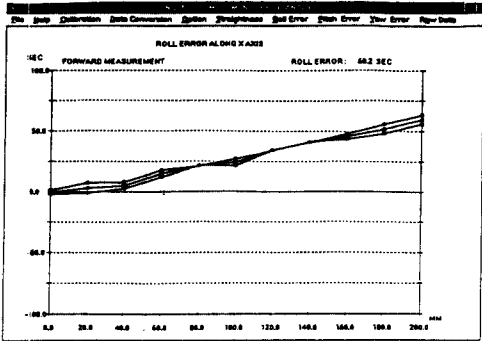
X축으로 테이블이송시 Z축에 의한 회전오차를 의미한다. 그림 3과 같이 두 개의 포



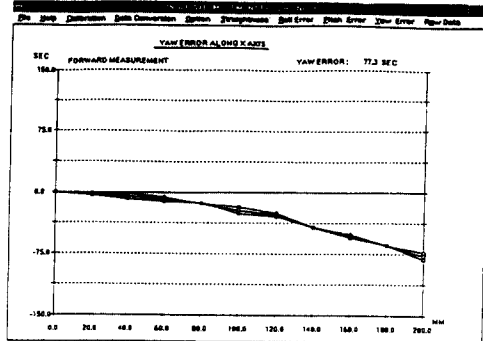
(a) 수평진직도오차



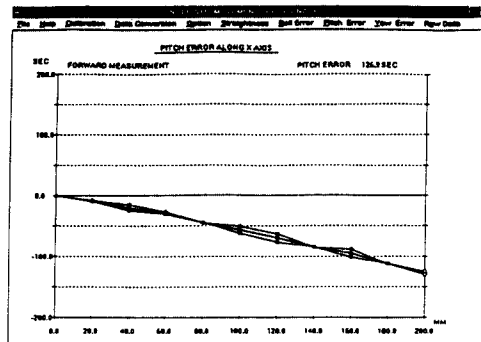
(b) 수직진직도오차



(c) 롤오차



(d) 피치오차



(e) 요오차

그림 10 측정된 각각의 오차

토 다이오드 1과 2 사이의 거리를 $L_{1,2}$ 와 3과의 거리를 L_2 , 그리고 수평 평행도오차를 θ_2 라하면, 요(yaw)오차는 다음과 같이 나타내진다.

$$\text{요오차} = \frac{(Y_2(X) - Y_3(X)) + L_1 \times \text{Roll}(X) - \theta_2 X}{L_2} \quad (9)$$

개발된 광전센서시스템으로 축 운동을 수행하는 기계를 측정하여, 각각의 오차성분을 측정하였다. 그림 10(a)~(e)는 측정된 각각의 오차를 보이고 있다. 동일한 기계에 대해서 각각의 오차성분을 레이저 간섭계, 전기레벨 등을 이용하여 측정한 결과 매우 근사한 결과를 얻었다.

5. 맺음말

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

- (1) 광전소자와 레이저광원을 이용하여 축 이송시에 발생하는 5개의 운동오차를 동시에 검출하는 측정방법이 개발되었으며, 이때의 정밀도는 마이크로미터 오더이다.
- (2) 광전소자에 대한 2차원 칼리브레이션이 수행되었으며, 비선형성을 고려할 때 더욱 정밀한 측정값을 얻을 수 있었다.
- (3) 레이저간섭기 등에 의해서 측정이 어려운 롤(roll)오차의 측정방법이 구현되었으며, 이때 빔분리기의 오차를 칼리브레이션할 때, 정밀한 측정값이 얻

어질 수 있었다.

- (4) 광전소자측정시스템을 마이크로 컴퓨터와 연계함으로써, 종래의 측정방법보다 매우 빠르며, 정밀한 측정시스템이 구현되었다.

후 기

본 연구는 1993년 한국과학재단의 특정기초연구비 지원으로 이루어진 연구임을 밝힌다.

참고문헌

- (1) Weck, M., 1980, "Metrological Analysis and Performance Test," John & Wiley, *Handbook of Machine Tools*, Vol. 4. pp. 9~35.
- (2) 5526A Laser Measurement System, Hewlett Packard Co.
- (3) 박희재, 황상욱, 정무영, 1993, "광전소자를 이용한 공작기계 또는 다축메카니즘의 롤, 수평·수직진직도 측정시스템개발," 대한기계학회 1993년도 추계학술대회논문집, pp. 481~486. ■