

(論 文)

# 광위상 간섭을 이용한 이송축의 운동오차 실시간 보상

이형석\* · 김승우\*

(1993년 7월 29일 접수)

## Real-Time Correction of Movement Errors of Machine Axis by Twyman-Green Interferometry

Hyung-Seok Lee and Seung-Woo Kim

**Key Words :** Twyman-Green Interferometry(트위만-그린 간섭계), Piezoelectric Actuator(압전 구동기), Interferometric Fringe Pattern(간섭 무늬), Hetero-Dyne Laser Interferometer(헤테로다인 레이저 인터페로메터), Real-Time Correction(실시간 보상), Table Motion Error(테이블 운동오차)

### Abstract

This paper presents a real-time correction method of the movement errors of a translatory precision machine axis. This method is a null-balance technique in which two plane mirrors are used to generate an interferometric fringe pattern utilizing the optical principles of Twyman-Green interferometry. One mirror is fixed on a reference frame, while the other is placed on the machine axis being supported by three piezoelectric actuators. From the fringe pattern, one translatory and two rotational error components of the machine axis are simultaneously detected by using CCD camera vision and image processing techniques. These errors are then independently suppressed by activating the piezoelectric actuators by real-time feedback control while the machine axis is moving. Experimental results demonstrate that a machine axis can be controlled with movement errors less than 10 nm in vertical straightness, 0.1 arcsec in pitch, and 0.06 arcsec in roll for 50 mm travel by adopting the real-time correction method

### 1. 서 론

정밀기계에서의 테이블의 운동 정밀도는 기능 수행의 기본을 이루므로, 여러분야에서 그 중요성이 날로 증대하고 있다. 특히 정밀측정분야 및 정밀가공분야의 경우 테이블의 운동 정밀도의 향상을 위하여 여러가지 방법들이<sup>(1,2)</sup> 모색되고 있으나, 테이블의 운동오차 발생 및 운동오차의 불완전한 보정

등의 영향으로 인하여 운동정밀도 향상에 어려움을 가지고 있다. 초정밀 기계류의 경우,<sup>(3)</sup> 테이블 이송시 발생하는 운동오차는 그 기능에 심각한 영향을 끼치므로 테이블 이송중 운동오차를 측정하여, 보상하는 운동오차 실시간 보상이<sup>(4,5)</sup> 앞으로 더욱 필요할 것으로 인식된다.

본 연구는 기계이송 테이블의 기하학적 운동오차의 실시간 보상(real-time correction)에 관한 것이다. 테이블 이송시 발생하는 운동오차의 실시간 보상을 위하여, 레이저를 사용한 트위만-그린 간섭계(Twyman-Green interferometry)의 원리<sup>(6)</sup>를 이용

\*정회원, 한국과학기술원 정밀공학과

하여 이송중인 테이블의 운동오차를 측정하고, 측정된 운동오차는 테이블 밑면에 부착된 압전구동기 (piezoelectric actuator)를 영점 (null-balance) 제어하여 실시간 보상하였다. 이와 같이 트위만-그린 간섭계를 테이블의 운동오차 측정에 사용할 경우, 한번 측정된 간섭무늬로부터 2개의 회전 운동오차량과 1개의 직진 운동오차량을 동시에 측정할수 있다는 특징을 가진다.

기계 테이블의 이송시 발생하는 오차의 종류에는 Fig. 1과 같이 3개의 직선 운동오차와 3개의 회전 운동오차로 구성된 총 6개의 독립오차 성분이 존재한다.

본 연구에서 실시간 보상의 대상오차는 측정 간

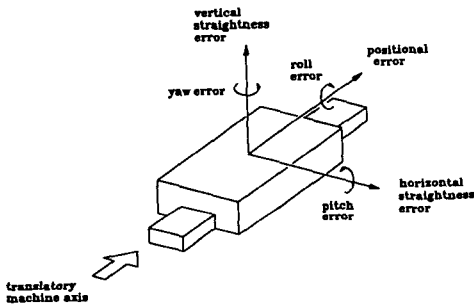


Fig. 1 Six error components in translatory machine axis

섭계의 장착시 편의상 테이블의 피치 (pitch) 오차, 롤 (roll) 오차, 수직방향직진도 (vertical straightness) 오차에 적용하였다.

Fig. 2는 트위만-그린 간섭계와 압전구동 테이블을 이용한 테이블 운동오차의 실시간 보상 시스템의 구성도이다.

기계상의 고정된 기준지지에 대해 기준 반사경을 고정하고, 레이저광을 사용하여 테이블위에 장착된 측정반사경과 간섭을 야기시키면 테이블의 공간적 위치상태에 따른 간섭무늬 (interferometric fringe pattern)가 발생한다. 이 간섭무늬를 CCD카메라로 포착하여 컴퓨터로 받아들이고, 해석하여 테이블의 운동오차량을 파악한다. 측정된 오차량은 테이블 밑에 장착된 3개의 압전구동기를 사용하여 보상되며, 이 측정 및 보상작용은 테이블 이송시 연속적으로 행하여진다.

## 2. 트위만-그린 광위상 간섭

Fig. 3은 테이블의 운동오차를 측정하기 위한 트위만-그린 간섭계의 기본원리이다. 광확대기에 의하여 확대된 파장이  $\lambda$ 인 He-Ne 레이저광은 광분할기에 의하여 기준광속과 측정광속으로 분할되며, 기준반사경 M1과 측정반사경 M2에 입사된다.

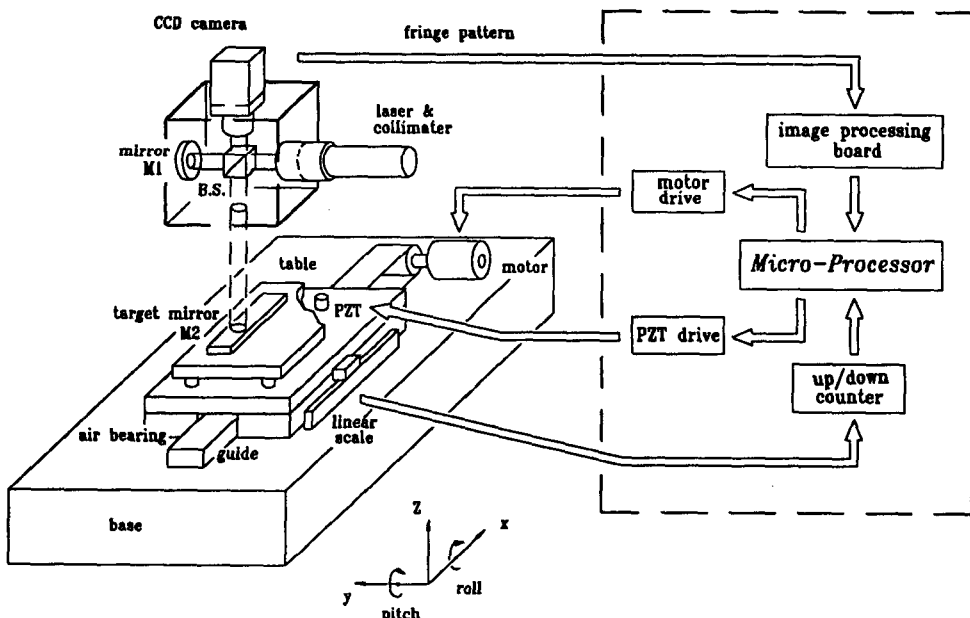


Fig. 2 Real-time correction system of movement errors in machine axis

각 반사경의 표면이 평면이라 가정하면, 기준반사경 M1에서 반사되어 온 광의 파두면은 동일위상을 가지며 다음과 같이 기술된다.

$$W_r = a \exp(2jkl) \quad (1)$$

여기서,  $a$ 는 기준반사경 M1의 반사광 진폭이며,  $l$ 은 광분할기와 기준반사경 사이의 거리,  $j$ 와  $k$ 는 각각  $\sqrt{-1}$ 과  $2\pi/\lambda$ 인 상수이다.

측정반사경 M2로부터 반사되어 오는 광의 파두면은 측정반사경의 공간적 위치상태에 따라 결정된다. 즉, 기준반사경 M1에 의하여 결정되는 간섭계의 측정좌표축으로부터, 측정반사경의 표면이  $z(x, y)$ 로 표현될 경우 다음과 같이 기술된다.

$$W_i = b \exp(2jk[l - z(x, y)]) \quad (2)$$

이때,  $b$ 는 측정반사경의 반사광 진폭이며,  $z(x,$

$y)$ 는 측정반사경의 표면을 나타내는 식으로 기울어진 각  $\phi_x$ 와  $\phi_y$ 가 작다면, 다음과 같이 표현된다.

$$z(x, y) = z_0 + \phi_x y - \phi_y x \quad (3)$$

식(1), (2)로 표현되는 두 반사광의 파두면은 광분할기에서 결합하며, 두 파두면의 위상차에 의해서 간섭무늬가 생성된다. 간섭무늬  $I(x, y)$ 는 식(1)과 (2)로부터 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} I(x, y) &= |W_r + W_i|^2 \\ &= |a \exp(2jkl) + b \exp(2jk[l - z(x, y)])|^2 \\ &= a^2 + b^2 + 2ab \cos[2kz(x, y)] \\ &= I_0[1 + \gamma \cos[2k(z_0 + \phi_x y - \phi_y x)]] \end{aligned} \quad (4)$$

여기서,  $I_0$ 는 평균 빛의 강도를 나타내며,  $\gamma$ 는 간섭무늬 대비 (fringe contrast),  $\phi_x, \phi_y$ 는 측정반사경의 회전각,  $z_0$ 는 동일위상으로부터의 거리이다.

식(4)에 의하여 생성된 간섭무늬  $I(x, y)$ 의 형태는 기준반사경에 대한 측정반사경의 공간적 위치상태를 나타내므로, 측정반사경을 기계 이송 테이블면에 장착했을 경우, 간섭무늬 영상은 기준반사경에 대한 측정반사경의 운동 즉, 테이블 운동상태에 따라 변하며, 2개의 회전운동 성분과 1개의 직선운동 성분에 대한 정보를 내포한다.

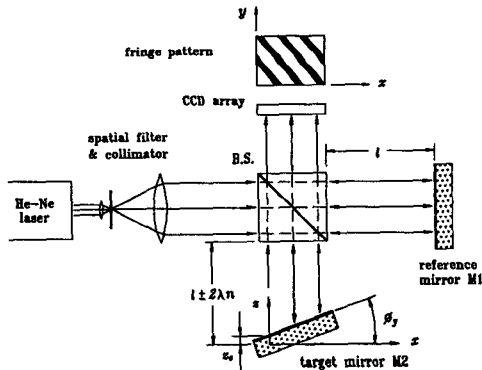


Fig. 3 Twyman-Green interferometry

### 3. 간섭무늬 영상 해석

Fig. 4는 측정좌표계  $(x, y, z)$ 에 대한, 테이블 상

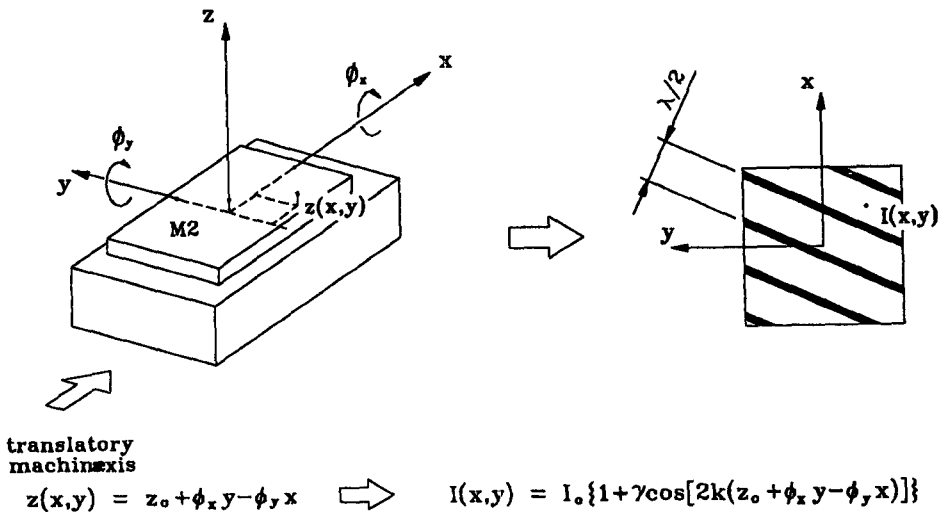


Fig. 4 The relation between translatory errors and fringe pattern

의 측정반사경 표면위치  $z(x, y)$ 와, 이에 해당하는 간섭무늬 영상의 밝기  $I(x, y)$ 와의 관계를 나타낸다.

식(4)로 표현되는 간섭무늬 영상은 테이블의 운동오차가 큰 경우에는 높이차이  $\lambda/2$ 마다 동일 밝기를 가지는 주기성을 나타내며, 테이블의 기울어

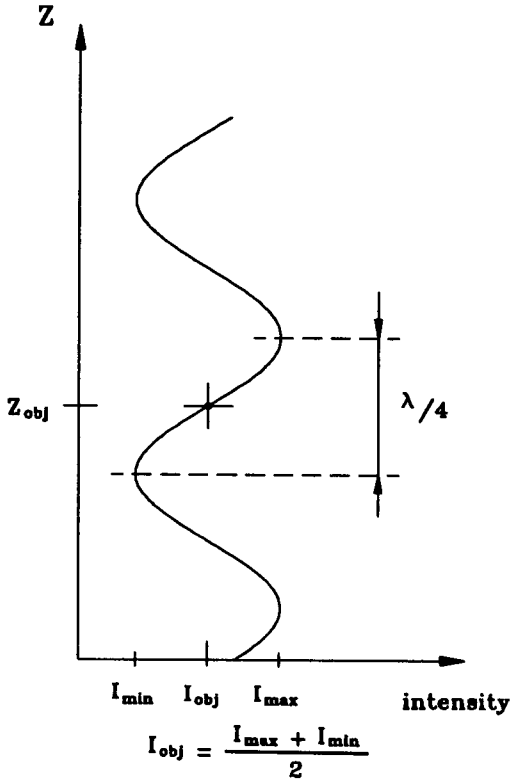


Fig. 5 The periodic intensity signal of interferometric fringe

진 상태가 주기적인 간섭무늬로 변환되는 과정에서 테이블의 기울어진 방향에 대한 정보를 상실하게 된다. 즉, 측정반사경의 한점에서, 높이  $z$ 에 따른 간섭무늬  $I$ 는 Fig. 5와 같이 주기적으로 변화한다. 간섭무늬의 주기성 때문에 발생하는 방향성 상실과 높이에 따른 반복적 신호의 제약성을 극복하기 위하여, 목표밝기  $I_{obj}$ 를 중심으로  $\lambda/4$  구간의 높이  $z$ 와 밝기 신호  $I$ 의 비례부분을 테이블의 공간적 상태 측정에 사용한다.

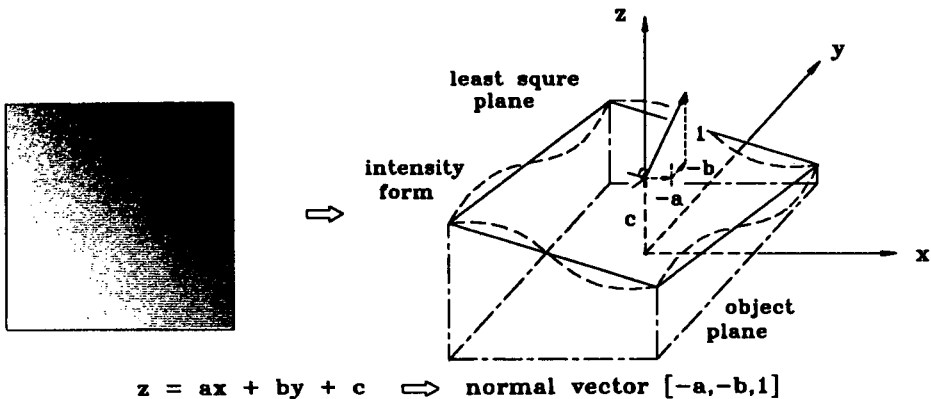
간섭계의 초기 장착시 간섭무늬 밝기가 이  $\lambda/4$ 의 측정구간에 들게 장착한 후, 테이블 이송중에 연속적으로 운동오차를 측정하고, 압전구동기를 사용하여 제어하게 되면, 간섭무늬 밝기는 측정구간을 벗어나지 않게되며, 테이블 이송중 운동오차의 연속적 측정이 가능하다.

간섭무늬 밝기를 이용한 운동오차 측정은 측정반사경 표면의 각 위치  $x, y$ 에서 간섭무늬 밝기량  $I(x, y)$ 을 목표한 테이블 위치로부터의 거리량  $z(x, y)$ 으로 변환하고, 최소자승법 (least square method)을 적용하여 현재 테이블이 위치한 평면의 방정식을 유도한다. 이 평면의 방정식으로 부터 테이블의 운동오차를 구한다.

간섭무늬 영상의 각 측정위치  $x, y$ 에서의 밝기  $I(x, y)$ 로부터, 현재 테이블의 위치와 목표한 테이블 위치사이의 거리  $z(x, y)$ 는 식(5)과 같이 기술될 수 있다.

$$z(x, y) = K_z \cdot (I(x, y) - I_{obj}) \tag{5}$$

이때,  $I_{obj}$ 는  $(I_{max} + I_{min})/2$ 인 간섭무늬 밝기이며, 비례상수  $K_z$ 는 테이블의 높이  $z$ 에 따른 간섭무늬 밝기  $I$ 사이의 관계로부터  $z_{obj}$ 에서의 기울기를 나



$$z = ax + by + c \Rightarrow \text{normal vector } [-a, -b, 1]$$

Fig. 6 Least square method for table moving errors measurement

타내며 다음과 같이 표현된다.

$$K_z = \frac{dz}{df} \Big|_{z=z_{obj}} = \frac{\lambda}{2\pi(I_{max} - I_{min})} \quad (6)$$

각 위치에서의 수직거리 오차  $z(x, y)$ 를 최소자승법에 대입하여 통계적 평면을 구할수 있으며, 이 평면의 법선벡터로부터 테이블의 목표위치와의 오차량을 구할수 있다. Fig. 6은 이와 같은 관계를 나타낸다.

측정반사경의 표면을 식(7)과 같은 방정식으로 정의하고,

$$z = ax + by + c \quad (7)$$

최소자승법을 적용 통계적 평면을 구하기 위하여 오차함수  $\epsilon$ 을

$$\epsilon^2 = \sum_{i=1}^N (ax_i + by_i + c - z_i)^2 \quad (8)$$

와 같이 정의하고, 편미분하여 계수  $a, b, c$ 를 구하면 식(9)과 같이 기술된다.

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum x_i^2 & \sum x_i y_i & \sum x_i \\ \sum x_i y_i & \sum y_i^2 & \sum y_i \\ \sum x_i & \sum y_i & N \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sum z_i x_i \\ \sum z_i y_i \\ \sum z_i \end{bmatrix} \quad (9)$$

이때, 측정 좌표축을 측정영역의 중심에 잡으면,  $\sum x_i y_i = 0, \sum x_i = 0, \sum y_i = 0$  이므로, 식(9)은 간략화 된다. 식(7)으로 표현된 평면의 법선벡터  $[-a, -b, 1]$ 와 테이블의 운동오차를 상관시켜 고려하면, 이송중인 테이블의 운동오차는 다음 식들로 기술된다.

$$\text{Pitch error } \phi_y \cong -a = -\frac{\sum x_i z_i}{\sum x_i^2} \quad (10)$$

$$\text{Roll error } \phi_x \cong b = \frac{\sum y_i z_i}{\sum y_i^2} \quad (11)$$

$$\text{Vertical straightness error } z_o = c = \frac{\sum z_i}{N} \quad (12)$$

위식들로부터 측정된 테이블의 운동오차는 3개의 압전구동기의 구동으로 보상되어진다.

#### 4. 압전구동 테이블시스템 변수보정 및 자유도 비연성화

테이블 이송중 운동오차량을 보상하기 위하여 테이블 밑면에 3개의 압전구동기를 장착하고, 제어하

여 오차량을 보상한다. Fig. 7은 이송 테이블위에 장착하기 위하여 제작된 압전구동 테이블의 개략도이다. 각 압전구동기 제어입력으로부터 테이블의 공간적 상태변화에 대한 모델링은 3개의 압전구동기에 의하여 3가지 운동오차량이 제어되며, 각 제어량간이 연성되어 있는 다중입력-다중출력(multiple input multiple output) 시스템<sup>(7,8)</sup>이다.

압전구동기를 전압-변위 비례계로 생각하고, 압전구동기에 가해지는 전압행렬  $U$ 와 테이블 상태행렬  $Z_o$  사이에는 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$M\ddot{Z}_o + D\dot{Z}_o + KZ_o = KTAU + DTA\dot{U} \quad (13)$$

여기서,  $M$ 은 테이블의 관성행렬,  $D$ 는 테이블과 압전구동기의 감쇠행렬,  $K$ 는 테이블과 압전구동기의 강성행렬,  $Z_o$ 는 테이블의 상태행렬 $[\phi_{ox}, \phi_{oy}, z_o]^T$ ,  $U$ 는 압전구동기 인가 전압행렬 $[u_1, u_2, u_3]^T$ ,  $A$ 는 압전구동기 인가 전압과 압전구동기 변위 변환행렬,  $T$ 는 압전구동기 변위와 테이블의 상태 변환행렬을 나타낸다.

제어 오차량  $E$ 와 압전구동기 인가 전압  $U$ 사이의 관계는 다음과 같다.

$$U = G_c(s) (\hat{T} \cdot \hat{A})^{-1} \cdot E \quad (14)$$

여기서,  $G_c(s)$ 는 제어기 전달함수로  $k_i/s$ ,  $E$ 는 테이블 상태 오차행렬,  $(\hat{T}\hat{A})^{-1}$ 는 압전구동기 인가 전압과 테이블 상태 변환 행렬 $(TA)^{-1}$ 의 추정 행렬을 나타낸다.

위의 두 식(13), (14)로부터, 시스템 블록선도는 Fig. 8과 같이 나타낼수 있다.

압전구동 테이블의 구동 성능은 실제 테이블 시스템의 특성을 나타내는  $TA$ 행렬을 시스템 추정행렬  $\hat{T}\hat{A}$ 로 얼마나 정확히 추정하느냐에 달려있

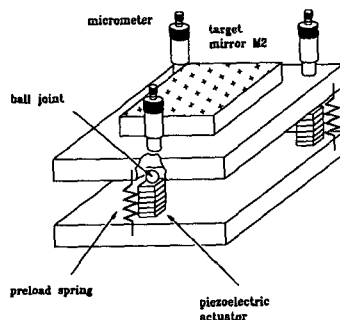


Fig. 7 The Correction table driven by piezoelectric actuators

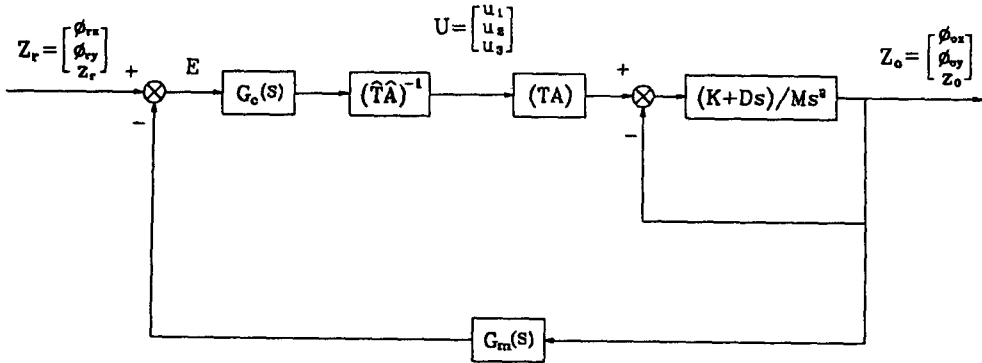


Fig. 8 System block diagram

다. 테이블시스템의 특성을 추정하는  $\hat{T}\hat{A}$  행렬은, 테이블의 설계 치수, 압전구동기와 압전구동기 구동에 사용한 고출력 증폭기의 사양 등의 시스템 사양으로부터 추정할 수 있으나, 실제 테이블 제작시 발생하는 가공오차, 각 압전구동기와 구동에 필요한 각 고출력 증폭기의 특성 차이 등에 의하여 추정량과 실제량은 많은 오차를 가지고 있다. 정밀구동을 위해서는 이러한 테이블 시스템 추정 행렬을 실험적으로 보정해야 하며, 이와 같은 보정은 테이블 제어에 있어서 제어성과 시스템 안정성을 높여 준다.

압전구동기의 제어입력에 따른 테이블의 고유진동을 피하기 위하여, D/A 변환기와 압전구동기 구동용 고출력 증폭기의 사이에 2차 저대역 필터를 장착하여 구동하였다. 저대역 필터의 차단주파수를 5~6 Hz 정도로 하여, 압전구동 테이블의 고유진동수(30~35 Hz)보다 매우 작게 하였으므로, 테이블의 동적특성은 거의 영향을 주지 않으며, 정적모델로의 고려가 가능하다. Fig. 8로부터 시스템을 정적모델로 가정하면, 각 압전구동기를 구동하는 전압  $\Delta U$ 는 다음과 같이 기술될 수 있다.

$$\Delta U = (T \cdot A)^{-1} \cdot \Delta Z_o \quad (15)$$

$$\Delta U = (\hat{T} \cdot \hat{A})^{-1} \cdot \Delta Z_r \quad (16)$$

여기서,  $\Delta Z_r$ 은 테이블의 목표 상태행렬 변화량이며,  $\Delta Z_o$ 는  $\Delta Z_r$ 의 입력에 따라 출력된 테이블 상태행렬의 변화량이다. 위 두 식으로부터  $\Delta U$ 를 소거하고, 시스템행렬  $(TA)^{-1}$ 에 대해서 전개하면 다음과 같이 기술된다.

$$(TA)^{-1} = (\hat{T}\hat{A})^{-1} \cdot \Delta Z_r \cdot \Delta Z_o^{-1} \quad (17)$$

위식에서  $(TA)^{-1}$ 의 추정행렬  $(\hat{T}\hat{A})^{-1}$ 을 반복적인

형태로 표시하면, 다음과 같은 표현이 가능하다.

$$(\hat{T}\hat{A})^{-1} = (\hat{T}\hat{A})^{-1}_{i-1} \cdot (\Delta Z_r)_{i-1} \cdot (\Delta Z_o)^{-1}_{i-1} \quad (18)$$

즉, 시스템 추정행렬  $(\hat{T}\hat{A})^{-1}$ 을 정확히 추정하기 위하여서는 식(18)을 사용하여 반복적인 실험을 통한 보정으로 구할 수 있다.

본 논문에서 사용한 압전구동 테이블의 반복적 보정을 통한, 구동성능 향상과 각 제어량간의 비연성(decoupling) 과정을 단계에 따라 나타내 보면, Fig. 9과 Fig. 10와 같이 나타난다. 2차와 3차에 걸친 반복적인 보정방법에 의해  $(\hat{T}\hat{A})^{-1}$ 를 구함에 따

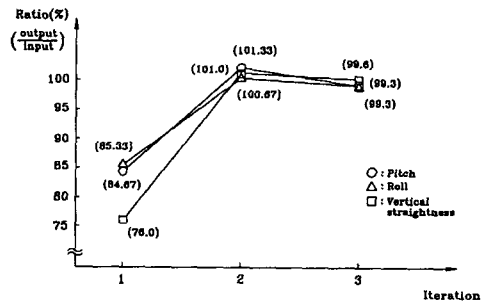


Fig. 9 Table gain tuning

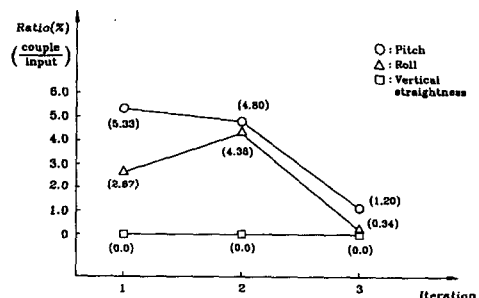


Fig. 10 Control parameter decoupling

라 테이블의 구동성능이 좋아지고 있으며, 연성되어 있던 각 제어 요소간의 비연성이 이루어지고 있음을 알 수 있다.

Fig. 9는 각 제어량의 입력과 출력정도 즉, 입출력간의 이득률(gain)을 찾는 과정으로 ratio는  $|AZ_{oil}|/|AZ_{ril}| (i=1\sim3)$ 을 나타낸다. Fig. 10은 각 제어량 간의 비연성화 과정을 나타내며, 이때의 ratio는 각 제어량 간의 연성정도인  $\sum_{j=1}^3 |AZ_{oij}|/|AZ_{ril}| (i=1\sim3, i \neq j)$ 를 나타낸다.

시스템 추정행렬( $\hat{T\hat{A}}$ )<sup>-1</sup>의 보정을 위한 측정에는 Hewlett Packard사의 5028A 헤테로-다인 레이저 인터페로메터를 사용하였으며, 이 장비의 각도 측정 분해능은 0.1 arcsec, 변위측정 분해능은 10 nm 이다.

### 5. 실험

테이블의 이송시 발생하는 테이블 운동오차를 측정하여 실시간 보상을 하기 위하여, 트위만-그린 간섭계와 압전구동 테이블을 제작하고, 이송 테이블에 장착하여, 테이블 운동오차 실시간 보상 시스템을 구성, 실험하였다. 이때 사용된 이송 테이블은 실험실에서 보유하고 있는 3차원 측정기 Y축을 이용하였으며, 이 이송 테이블 위에 압전구동 테이블을 장착하였다. Fig. 11은 이와 같은 개념으로 실험 대상이 되었던 3차원 측정기 테이블에 트위만-그린 간섭계와 압전구동 테이블을 장착했을 경우의 그림을 나타낸다.

Fig. 12는 실험장치의 테이블 이송시 나타나는 운동오차로, 운동오차의 실시간 보상을 실시하지 않았을 경우 테이블이 가지는 운동오차를 나타낸다. 측정은 Hewlett Packard사의 5028A 헤테로-다인 레이저 인터페로메터를 사용하였다.

운동오차의 보상없이 테이블을 이송하였을 경우, 피치오차 0~1.4 arcsec 정도, 수직방향 직진도 오차 ±500 nm의 범위를 가진다. 이때 롤운동오차는 레이저 인터페로메터로 측정이 불가능한 양이므로 측정할 수 없었다.

Fig. 13은 테이블 이송시 발생하는 운동오차를 압전구동기를 사용하여 실시간 보상한 결과이다. 실험은 평면도 λ/20의 기준반사경과 λ/10의 측정반사경을 사용하였으며, 이송에 따른 측정반사경의 평면도 오차는 무시하였다. 테이블 이송은 측정반사경 크기의 제한으로, 총행정 50 mm에 걸쳐 운동

오차 실시간 보상을 실시하였으며, 실시간 보상중 0.5 mm 간격으로 보상오차를 측정하였다.

Fig. 13(a)는 운동오차 실시간 보상중의 테이블

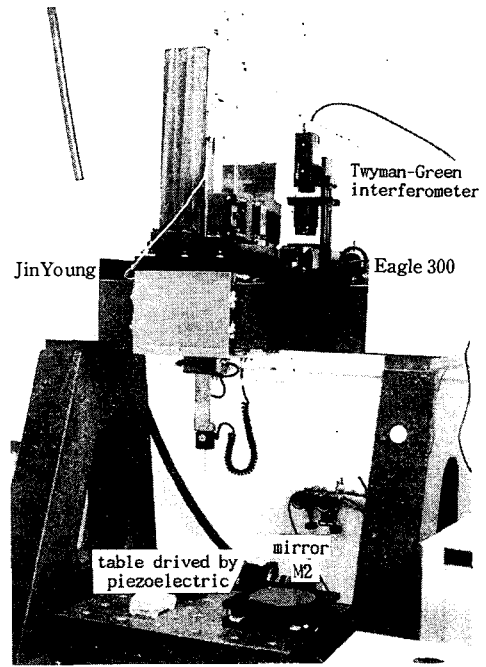


Fig. 11 The experimental apparatus

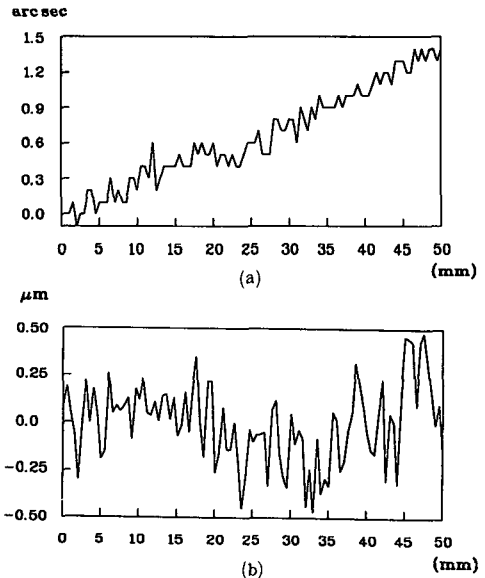
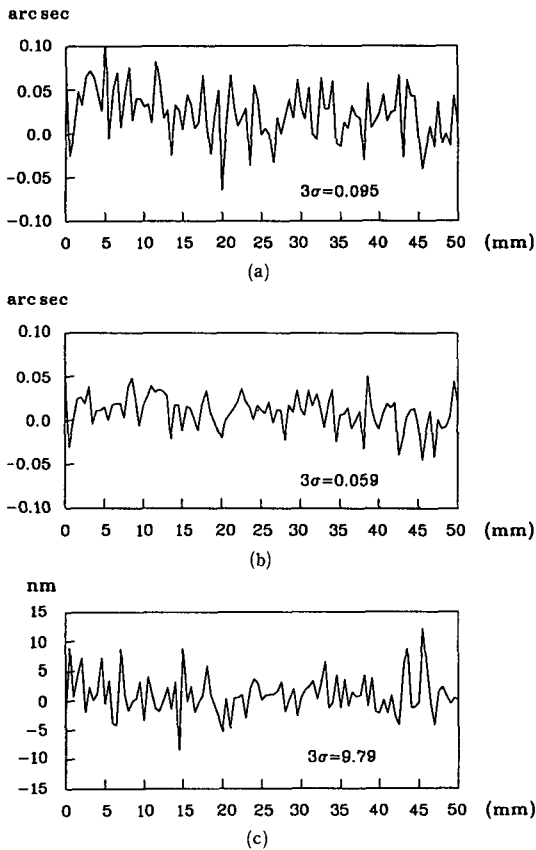


Fig. 12 (a) Pitch error of moving table  
(b) Vertical straightness error of moving table



**Fig. 13** (a) Pitch error during correction control  
 (b) Roll error during correction control  
 (c) Vertical straightness error during correction control

의 피치운동오차를 나타내며, 오차범위( $3\sigma$ ) 0.095 arcsec 정도를 가지고 있다. Fig. 13(b)는 테이블의 롤운동에 대한 운동오차를 나타내고 있으며, 오차범위( $3\sigma$ ) 0.059 arcsec 정도로 들고 있다. Fig. 13(c)은 테이블 이송시의 수직방향 직진도 운동오차 성분을 나타내며, 9.79 nm 정도의 오차범위( $3\sigma$ )를 가진다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 정밀기계 이송 테이블의 기하학적 운동오차의 실시간 보상을 위하여, 트위만-그린 방식의 간섭계를 사용하였으며, 이때 발생한 간섭무늬의 해석을 통하여 2개의 회전운동 오차와 1개의 직진 운동오차를 하나의 간섭무늬로부터 동시에 측

정하였다. 이 측정된 운동오차량을 압전구동기를 사용하여 실시간 보상하였다.

실험은 3차원 측정기의 이송 테이블에 압전구동 테이블을 장착하여 실시하였으며, 간섭계 설치의 편의상 테이블의 피치, 롤, 수직방향 직진도 운동오차 성분에 대하여 실행하였다. 테이블의 운동오차 실시간 보상의 운동정밀도는 50 mm 테이블 이송시, 수직방향 직진도운동을  $\pm 10$  nm, 피치운동을  $\pm 0.1$  arcsec, 롤운동을  $\pm 0.06$  arcsec 이내의 정밀이송을 달성하였다.

## 참고문헌

- (1) Jonge, L. D. and Kruth, J.P. 1993, "Self-Calibration Method for Three Dimensional Coordinate Measuring Machines Using a Ball Plate," Proceedings of the 7th International Precision Engineering Seminar, Kobe, Japan, pp. 402~413.
- (2) Busch, K. et al., 1984, "Numerical Error-Correction of a Coordinate Measuring Machine," Proceedings of a International Symposium on Metrology for Quality Control in Production, Tokyo, pp. 278.
- (3) Sjigeo Moriyama, 1991, "Precision Aspheric Generators for Off-axis X-Ray Mirrors and Asymmetric Aspheric Lenses," Progress in Precision Engineering, Braunschweig, Germany, pp. 243~254.
- (4) Joji Yamaguchi, Kaiji Sato, Hisayuki Aoyama and Akira Shimokohbe, 1991, "Measurement and Control of Straight Motion Accuracy Using Liquid Surface for Absolute Reference," JSPE, Vol. 57, No. 3, pp. 526~531.
- (5) Akira Shimokohbe and Hisayuki Aoyama, 1991, "An Active Air Bearing: a Controlled-Type Bearing with Ultra Precision, Infinite Static Stiffness, High Damping Capability and New functions," Nanotechnology, pp. 64~71.
- (6) Daniel Malacara, 1978, "Opical Shop Testing," John Wiley & Sons Inc.
- (7) Yoshiyuki Tomita, Fumiaki Satoh, Kazuhiro Itoh and Yasushi Koyanagawa, 1992, "Decoupling Method of Ultra Precision stage using Parallel Linkage Mechanism," JSPE, Vol. 57, No. 6,



- pp. 1078~1084.
- (8) Yoshiyuki Tomita, Kazuho Kodaira, Fumiaki Satoh, Kazuhiro Itoh and Yasushi Koyanagawa, 1992, "A 6-Axes Motion Control Method for Parallel-Linkage-Type Fine Motion Stage," JSPE, Vol. 58, No. 4, pp. 684~690.