

## 확장 트와이만-그린 간섭계를 이용한 운동 오차의 실시간 측정 및 보상

오정석\*(한국과학기술원 기계공학과), 배은덕(삼성전자), 김승우(한국과학기술원 기계공학과)

### Real-time Measurement and Compensation of Motion Errors Using Extended Twyman-Green Interferometry

J.S. Oh(M.E. Dept. KAIST), E.D. Bae(Samsung Electronics), S.W. Kim(M.E. Dept. KAIST)

#### ABSTRACT

This paper presents an extended Twyman-Green interferometry that enables simultaneous and real-time measurement of 5-DOF motion errors of the translational moving stage. This method uses a null balancing technique in which two plane mirrors are used as target mirrors to generate an interferometric fringe utilizing the optical principles of Twyman-Green interferometry. Fringe is detected by 2D photodiode array for high-speed measurement. Errors are then independently suppressed by activation of piezoelectric actuators through real-time feedback control while the machine axis is moving. Experimental results demonstrate that a machine axis can be controlled with motion errors about 10 nm in linear displacement, 0.15 arcsec in angular displacement.

**Key Words :** Twyman-Green interferometry(트와이만-그린 간섭계), Real-time compensation(실시간 보상)

#### 1. 서론

정밀 가공기 및 측정기에 있어서 일반적으로 가장 중요한 두 가지의 오차 요인을 든다면 열변형(thermal deformation) 및 아베 오차<sup>[1],[2]</sup>(Abbé error)로 나눌 수 있다. 특히 아베 오차의 경우 측정축(measurement axis)과 기능점(functional point) 간의 거리인 아베 오프셋(Abbé offset)과 이송 스테이지의 각 운동 오차가 곱해지는 형태로 나타나므로 정밀기계 시스템 설계에 있어서는 아베 오프셋을 줄이는 방법과 병행하여 운동 오차(특히 각운동 오차)를 줄이기 위한 노력이 중요하다. 예를 들면 삼차원 측정기의 경우 프로브(probe)를 이송하는 스테이지의 각 운동 오차에 의해 측정 데이터에서 아베 오차가 유발되고 이에 직선운동 오차가 더해지는 형태로 오차가 발생하게 되므로 이송 스테이지의 운동 오차를 줄이는 것이 측정 정밀도의 향상을 위해서 매우 중요하게 된다. 이송 스테이지의 오차는 크게 계통오차(systematic error)와 우연 오차(random error)로 분류되며 계통오차를 줄이는 가장 기본적인 방법은 스테이지의 안내면을 정밀하게 가공하고 조립하는

것이지만 이 경우에도 가공 및 조립의 불완전성으로 인해 잔류 오차(residual error)가 남게 되고, 이를 미리 측정하고 테이블을 구성하여 운동 오차를 보상하는 방법을 쓸 수 있지만 진동이나 외부 요인에 의해 발생하는 우연 오차 성분을 보상하는 데는 한계가 있다. 따라서 요구되는 정밀도가 이보다 높을 경우에는 이송 스테이지의 운동 오차를 실시간으로 측정하고 보상하는 시스템이 필요하게 된다. 본 연구에서는 트와이만-그린 간섭계<sup>[3]</sup>의 원리를 이용하여 스테이지 이송 중에 발생하는 이송 방향을 제외한 나머지 5 자유도의 운동 오차를 측정하기 위해 확장된 트와이만-그린 간섭계를 제안하였고 측정속도의 제한이 있는 CCD 대신 2 차원 포토 다이오드 배열을 사용해 검출 속도를 향상시킴으로써 실시간 보상이 가능하도록 하였다.

#### 2. 스테이지의 운동 오차 측정 및 보상 원리

##### 2.1 트와이만-그린 간섭계와 영점 제어

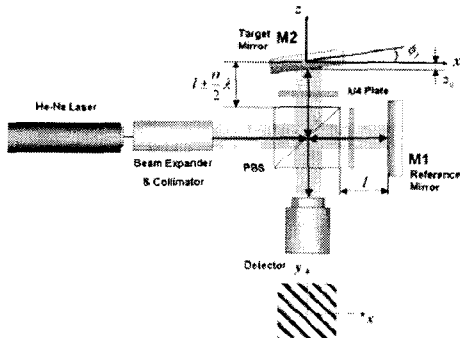


Fig. 1 Twyman-Green Interferometry

스테이지의 운동 오차를 측정하기 위한 기본적인 트와이만-그린 간섭계의 원리를 Fig. 1에 나타내었다. 기준반사경 M1에서 반사된 기준광(reference beam)은 전면에 걸쳐 동일 위상을 가지며, 그 파면(wave front)은 식(1)로 표현된다.

$$W_r = ae^{2jkz} \quad (1)$$

여기서,  $a$ 는 기준광의 진폭이고,  $k=2\pi/\lambda$ 는 파수(wave number)이다.

간섭계에 의하여 정의되는 좌표축  $x, y, z$ 에 대한 측정반사경 M2의 회전량  $\phi_x, \phi_y$ 가 작을 경우 측정반사경의 표면은 식(2)로 표현될 수 있다.

$$z(x, y) = -\phi_y \cdot x + \phi_x \cdot y + z_0 \quad (2)$$

그러므로, 측정반사경에서 반사된 측정광(measurement beam)의 파면은 측정반사경 표면 위치에 따른 함수로 식(3)과 같이 표현된다

$$W_m = be^{2jk\{-\phi_y x + \phi_x y + z_0\}} \quad (3)$$

여기서,  $b$ 는 측정광의 진폭이다. 기준광과 측정광은 편광광선분할기(polarizing beam splitter)에서 다시 합쳐지며, 검출되는 간섭무늬의 세기(intensity)는 식(1), (3)으로부터 식(4)와 같이 표현될 수 있다

$$I(x, y) = I_0 \{1 + \gamma \cos[2k\{-\phi_y x + \phi_x y + z_0\}]\} \quad (4)$$

여기서,  $I_0 = a^2 + b^2$ 는 간섭무늬의 평균 세기를 나타내며,  $\gamma = 2ab/(a^2 + b^2)$ 는 간섭무늬의 가시도(visibility)이다.

식(4)에서 알 수 있듯이 간섭무늬의 세기 정보로부터 측정반사경의 공간적 상태를 알아낼 수 있으나  $2\pi$ -모호성( $2\pi$ -ambiguity)으로 인해 방향성을 상실하고 높이에 따라 반복적인 신호가 발생하게 된다. 이를 해결하기 위해 Fig. 2(a)에서와 같이 초기에 간섭무늬 전 영역에 대하여 세기가  $I_0^*$  (높이  $z_0^*$

에 해당)가 되도록 측정반사경을 조정하며 이때  $z_0^*$ 를  $-\lambda/8$ 에 일치시킨다.

Fig. 2(b)에서 알 수 있는 바와 같이  $z_0^*$  주위의  $\lambda/4$  구간에 대해서는  $2\pi$ -모호성이 없으므로 방향 판별이 가능하다. 대부분의 경우 운동 오차가  $\lambda/4$ 를 초과하므로 측정반사경이 이 범위 내에서 움직이기 위해서는 별도의 미세구동 스테이지를 이용하여 영점제어를 하는 것이 필요하다.

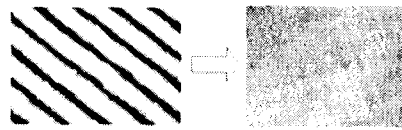


Fig. 2(a) Fringe nulling for initial setup

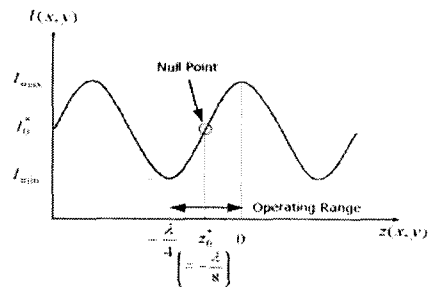


Fig. 2(b) Operating range

광 검출기의 화소 위치  $x, y$ 에서 측정된  $I(x, y)$ 에 해당하는 측정 반사경의 높이  $z(x, y)$ 는 식(4)로부터 식(5)와 같이 계산될 수 있다.

$$z(x, y) = \frac{1}{2k} \cos^{-1} \left[ \frac{1}{\gamma} \left\{ \frac{I(x, y)}{I_0} \right\} - 1 \right] \quad (5)$$

각 반사광의 진폭  $a, b$ 가 각각 반사경 전면에 걸쳐 동일하다고 가정하면,  $I_0$ 와  $\gamma$ 는 식(6)과 같이 표현된다.

$$I_0 = \frac{I_{\max} + I_{\min}}{2}, \quad \gamma = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (6)$$

따라서, 간섭무늬 세기의 최대치와 최소치를 미리 측정하면  $I(x, y)$ 로부터  $z(x, y)$ 를 구할 수 있다.

식(2)로 표현된 평면의 방정식에 최소자승법을 적용하기 위하여 오차함수를 다음과 같이 정의한다.

$$\varepsilon^2 = \sum_{i=1}^n \{(-\phi_y x_i + \phi_x y_i + z_0) - z_i\}^2 \quad (7)$$

좌표 축의 원점을 측정 영역 중심에 잡고 이 오

차함수를 구하려는 계수  $\phi_x, \phi_y, z_0$  로 각각 편미분한 값들이 0 이 되도록 정리하면 측정반사경 표면의 공간적 위치상태는 식(8)로 표현된다.

$$-\phi_y = \frac{\sum x_i z_i}{\sum x_i^2}, \phi_x = \frac{\sum y_i z_i}{\sum y_i^2}, z_0 = \frac{\sum z_i}{n} \quad (8)$$

식(8)에서 얻어진 측정반사경의 공간적 정보를 이용하여 간섭무늬가 일정한 세기  $I_0$  를 가지도록 미세구동 스테이지를 제어하게 되면, 측정반사경은 기준반사경에 의해 정의되는 일정한 평면  $z=z_0^*$  내 에 놓이게 되며 운동 오차가 실시간 보상되는 것을 뜻한다. 이 방법에서는 제어가 1 번 실행될 시간 안에 높이 방향의 변화가 측정영역을 벗어 나면 측정 및 제어 관계상 다른 안정점으로 수렴하게 되므로 영상획득 속도가 중요하게 된다. 따라서 본 연구에서는 영상획득 속도의 제한이 있는 CCD 를 대신하여 2 차원 포토 다이오드 배열을 사용하였다

## 2.2 확장 트와이만-그린 간섭계를 이용한 5 축 운동 오차의 측정

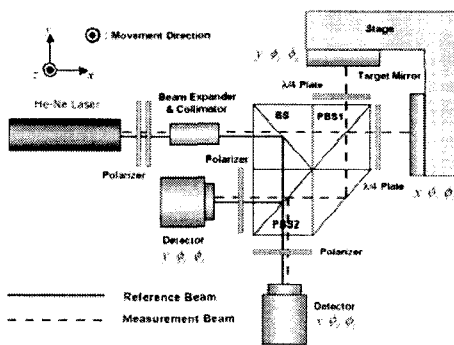


Fig. 3 Extended Twyman-Green Interferometry

Fig. 3 은 이송 스테이지의 5 자유도 운동 오차를 모두 측정할 수 있도록 확장된 구성을 나타낸다.

확장된 트와이만-그린 간섭계의 경우 수직하게 배열된 2 개의 트와이만-그린 간섭계가 하나의 모듈에 결합된 형태로 볼 수 있으며 크게 광원부(laser source), 광선분할기(beam splitter)부, 이송 스테이지에 장착되는 측정반사경(target mirror)부, 광 검출기로 구성되어 있다. 각각의 광 검출기의 간섭무늬 해석을 통하여 각각 3 자유도의 운동오차를 측정할 수 있지만  $\phi_z$  성분은 중복되는 정보로서 총 5 자유도의 값을 얻게 된다.

## 3. 실험장치 구성 및 결과

확장된 트와이만-그린 간섭계의 성능검증을 위

해서 본 실험실에서 보유하고 있는 정밀 스테이지를 이용하였으며 Fig. 4(a)는 구성된 실험장치를 보여 준다. 본 연구에서는 정밀 스테이지 중에서 헤테로다인 레이저 간섭계(트와이만-그린 간섭계의 측정값과 비교)와 미세구동 스테이지를 이용하였다. 헤테로다인 레이저 간섭계는 3 개의 직선변위 측정 모듈을 사용하며 직선변위의 경우 1.25 nm, 각변위의 경우 0.0057 arcsec 의 분해능을 갖고 있다.

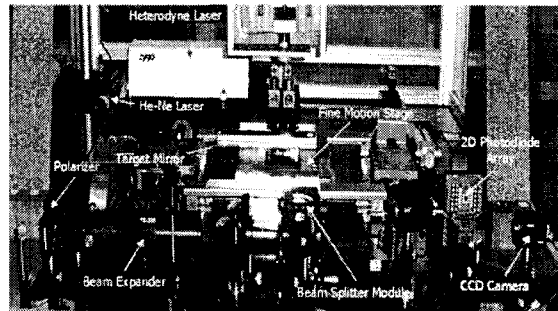


Fig. 4(a) Picture of experimental setup

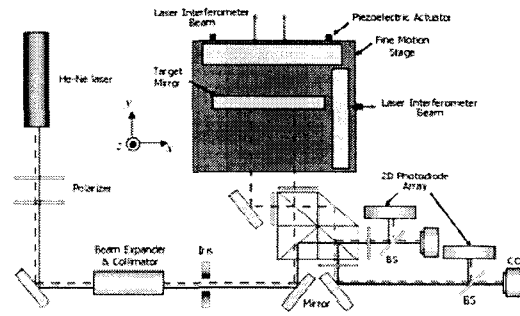


Fig. 4(b) Experimental configuration

실험 장치의 구성은 Fig. 3 에서 설명한 바와 같으나 사용된 미세구동 스테이지는 3 개의 압전구동기로  $x, y, \phi$  만 구동 가능하므로 Fig. 4(b)와 같이 한쪽 방향의 측정광을 반사경을 사용하여 45° 돌려서 측정반사경의 동일 면을 바라보도록 구성하였다. 이 경우 미세구동 스테이지를 구동할 때 각운동 없이 병진운동만 하거나 병진운동 없이 각운동만 하는 경우에는 두 개의 간섭무늬를 해석하여 얻어지는 변위량이 동일하여야 하므로 이를 기준으로 본 측정 시스템의 성능을 간접적으로 평가할 수 있다.

사용된 2 차원 포토 다이오드 배열은 Hamamatsu 사의 S7585 모델로 유효면적(active area)  $1.3 \times 1.3 \text{ mm}^2$  의 화소가  $5 \times 5$  로 배열되어있는 형태이다.

성능검증 실험은 크게 잡음 수준(noise level) 측정, 헤테로다인 레이저 간섭계와의 비교 그리고 운동 오차의 실시간 측정 및 보상 등 3 부분으로 나누어서 수행되었다.

잡음을 측정된 결과 직선 변위는 7.8 nm (P-V), 1.8 nm (S.D.), 각 변위는 0.11 arcsec (P-V), 0.02 arcsec (S.D.)의 결과를 보였다. 현재 실험장치의 공간적 배치 상 dead path 가 400 mm 정도로 매우 길기 때문에 공기의 난류로 인한 공기굴절을 변동이 가장 큰 원인으로 판단되며 이는 Fig. 3 과 같은 구성 시 dead path 를 대폭 줄일 수 있으므로 크게 감소시킬 수 있다. 이외에도 바닥 진동, 전기적 잡음, 레이저의 안정성 등이 영향을 미치게 된다.

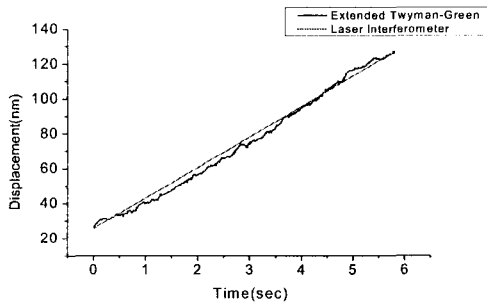


Fig. 5 Comparison with laser interferometer (linear)

Fig. 5 는 헤테로다인 레이저 간섭계를 이용하여 미세구동 스테이지를 되먹임 제어 (feedback control) 하면서 직선변위를 선형적으로 증가시켰을 때 확장된 트와이만-그린 간섭계에서 측정된 변위량과 비교한 결과이다. 두 측정값의 차이는 9.6 nm(P-V), 2.5 nm(S.D.)로 잡음 수준과 비슷하며 각변위는 0.15 arcsec(P-V), 0.03 arcsec(S.D.) 의 차이를 보였다. 나머지 하나의 포토 다이오드 배열에서 얻어진 결과는 두 측정값의 차이가 직선변위는 10.2 nm(P-V), 2.5 nm(S.D.), 각변위의 경우 0.16 arcsec(P-V), 0.03 arcsec(S.D.) 정도로 유사한 결과를 얻었으며 이로써 본 간섭계가 5 자유도의 운동 오차를 효과적으로 측정할 수 있음을 간접적으로 확인하였다.

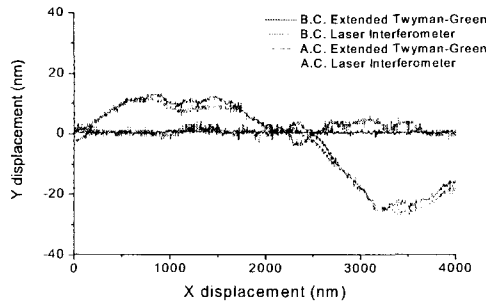


Fig. 6 Result of real time compensation

Fig. 6 은 미세구동 스테이지의 x 축을 4  $\mu$ m 구간

만큼 선형적으로 증가시키면서 확장된 트와이만-그린 간섭계의 측정값을 이용하여 운동 오차를 실시간으로 보상했을 때와 하지 않았을 때의 결과를 나타낸다. 실시간 보상을 수행하지 않았을 경우 직선 운동 오차가 약 40 nm(P-V), 13.3 nm(S.D.) 였으며 실시간 보상을 수행한 후에는 10.3 nm(P-V), 1.8 nm(S.D.)로 보상이 이루어 졌다. 각운동 오차의 경우는 실시간 보상 전 0.48 arcsec(P-V), 0.09 arcsec(S.D.)에서 실시간 보상 후 0.15 arcsec(P-V), 0.03 arcsec(S.D.)로 줄어들었다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 일반적으로 광학부품 제조분야 등에서 가공된 광학 부품의 형상 측정에 사용되는 트와이만-그린 간섭계의 원리를 이용하여 스테이지 이송 중에 발생하는 5 자유도의 운동 오차를 측정하기 위한 측정장치로 확장된 트와이만-그린 간섭계를 제안하였고 구현하였으며 2 차원 포토 다이오드 배열을 사용해 검출 속도를 향상시킴으로써 실시간 보상이 가능하도록 하였다.

실험 결과 직선변위는 7.8 nm (P-V), 1.8 nm (S.D.), 각변위는 0.11 arcsec (P-V), 0.02 arcsec (S.D.) 정도의 분해능을 보였으며 헤테로다인 레이저 간섭계와의 비교측정 결과 제안된 간섭계가 스테이지의 5 자유도 운동 오차를 효과적으로 측정할 수 있음을 보였다. 또한 이를 통해 실시간 보상을 수행한 결과 직선변위 10.3 nm(P-V), 1.8 nm(S.D.), 각변위 0.15 arcsec(P-V), 0.03 arcsec(S.D.)로 오차 보상이 이루어 졌다.

본 시스템의 성능향상을 위해서는 향후 위상변조(phase modulation)기법 및 위상민감검출기(phase sensitive detector)를 사용하여<sup>[4]</sup> nm 이하의 분해능을 얻을 수 있도록 추가적인 연구가 필요하다.

#### 참고문헌

1. E. Abbé, "Messapparate für Physiker", Zeits. Für Instrumenten-Kunde, Vol. 10, pp. 446-448, 1890
2. Bryan, J.B., "The Abbé principle revisited: an updated interpretation". Precision Engineering, Vol. 1, No. 3, pp. 129-132, 1979
3. 이형석, "광위상 간섭을 이용한 기계 이송축의 운동오차 측정 및 실시간 보상," 한국과학기술원, 박사학위논문, 1994.
4. A. Bergamin et al., "A displacement and angle interferometer with subatomic resolution", Review of Scientific Instruments, Vol. 64, No. 11, pp. 3076-3081, 1993