

# 간섭계에 있어서의 계통 오차의 자율 교정 알고리즘

후지모토 이쿠마츠#, 이태용\*

## Self-calibration Algorithm of Systematic Errors For Interferometer

Ikumatsu Fujimoto<sup>#</sup> and Lee Taeyong<sup>\*</sup>

### ABSTRACT

When an almost flat surface under test is measured by an interferometer, the measurement result is largely influenced by systematic errors that include geometrical errors of a reference flat surface.

To determine the systematic errors of the interferometer by the conventional method that is called the three flat method, we must take the reference flat surface out from the interferometer and measure it. Because of difficulties to set the reference flat surface to the interferometer exactly and quickly, this method is not practical.

On the other hand, the method that measures a surface under test with some shifts in the direction being perpendicular to the optical axis of the interferometer is studied. However, the parasitic pitching, rolling and up-down movement caused by the above shifts brings serious error to the measurement result, and the algorithm by which the influences can be eliminated is not still established.

In this paper, we propose the self-calibration algorithm for determining the systematic errors that include geometrical errors of a reference flat surface by several rotation shifts and a linear shift of general surface under test, and verify by a numerical experiment that this algorithm is useful for determining the systematic errors.

**Key Words** : Interferometer(간섭계), Surface measurement(형상 계측), Systematic errors(계통 오차), Self-calibration(자율 교정), Linear shift(리니어 쉬프트), Rotation shift(회전 쉬프트), Reference flat surface(참조면), Surface under test(피검면)

### 1. 서론

반도체 제조 과정에서, 실리콘 웨이퍼 평면도의 고정밀도 및 고속도 측정 등을 위한 간섭계측의 중요성이 높아지고 있다. 간섭계측은 주로

coherent 성이 높은 레이저 파장을 계측 척도로서 이용해 참조면에 대한 상대적인 측정으로서 비검면의 평면도를 결정하는 하나의 계측법이며 평면도 측에서 중요한 위치를 차지하고 있다. 이 방법에서는 참조면 형상을 미리 정확히 알고 있어야

접수일: 2005년 06월 15일 게재승인일: 2005년 2월 18일

# 교신저자: 선문대학교 기계공학부

E-mail [fujimoto@sunmoon.ac.kr](mailto:fujimoto@sunmoon.ac.kr) Tel(041)530-2858

\* 선문대학교 기계공학부

한다. 따라서, 기준이 되는 참조면의 교정방법이 간섭계측 연구에 있어서 주요한 주제가 된다.<sup>1,2</sup> 본 논문에서는 고정밀도를 실현하기 위해 참조면의 교정이 본질적으로 중요하다는 관점에서 참조면의 이상적인 평면에서의 차이 즉, 참조면 오차를 주로 광학 부품에 의한 파면의 왜곡 등을 포함하는 간섭계 시스템의 계통 오차를 결정하는 방법을 검토한다.

종래 기술은 참조면의 계통 오차를 측정하기 위한 3면 맞댐법(Three flat method)이 있다.<sup>3,4,5</sup>

그러나, 이 방법은 참조면의 정확한 설치 위치와 자세 설정에 있어서 큰 어려움을 안고 있다. 또, 참조면외의 계통 오차, 참조면의 설치 위치와 자세의 오차 영향 등은 실질적으로 해결할 수 없는 단점도 있다.

그러므로, 참조면이 간섭계에 장착되어 있는 대로 비검체를 간섭계의 광축과 직교되는 방향으로 linear shift 시키는 참조면 교정 방법(2 면법)이 많이 검토되어 있다. 그러나, 어떠한 방법이라도 비검체의 shift 에 수반하는 운동 오차 중에 특히 형상의 2 차 성분에 심각한 영향을 주는 pitching 오차 및 rolling 오차를 배제할 수 있는 방법이 아직까지 확립되지 못하고 있는 상황이다.<sup>6,7,8,9</sup>

그래서, 본 논문에서는 고정밀도 간섭계측을 실현하기 위해서 참조면을 간섭계에 설치되고 있는 상태에서 간섭계의 계통 오차를 결정하는 방법으로서 비검체를 shift 하는 방법을 검토한다.<sup>10</sup>

본 연구에서는 간섭계의 광축과 직교하는 방향으로 비검체를 shift 시키는 1 차원 positioning stage 와 회전 기구를 이용한다. 여기서, 이용하는 상기 positioning stage 와 회전 기구는 linear shift 전후에 있어서 rotation shift 의 재현성(rotation shift 수반하는 x 축방향에의 기울기 오차와 y 축방향에의 기울기 오차가 linear shift 전후로 같다)이 있다고 가정한다. 이것은 현재 회전 기구의 성능을 볼 때 충분히 현실적인 가정이다.

본 논문에서는, 상기 가정에 특정면을 이용하지 않고, 비검체의 rotation shift 와 linear shift 를 몇차례 해보고, 참조면오차를 포함하는 계통 오차를 결정할 수 있는 알고리즘을 소개한다. 그리고, 수치 실험을 통한 알고리즘의 타당성을 검증한다.

## 2. 계통 오차 결정을 위한 알고리즘

먼저, 시스템 좌표계  $(x, y, z)$  를 아래와 같이 결정한다.

비검체의 2 차원 영역에서 표면 높이의 상하 방향(광축 방향)을  $z$  축, 1 차원 positioning stage 의  $z$  축과 직교 하는 1 차원 이동 방향을  $x$  축,  $x$  축으로 직교 하는 다른 1 차원 이동 방향을  $y$  축으로 하는 좌표계로 설정하고  $(x, y)$  는 CCD camera 좌표계로 해당된다. 또,  $(0, 0, z)$  는 광축을 표시한다.

### 2.1 현실적인 가정

(1) 비검면 형상에 대한 가정

비검면 형상은 충분히 매끄럽다고 가정해서 아래와 같은 식으로 표현한다.

$$z(x, y) = \sum_{k=1}^n a_k(y)x^k + a_0(y) \quad (1)$$

$$a_0(y) = \sum_{k=0}^n b_k y^k \quad (2)$$

$$a_k(y) = \frac{1}{k!} \frac{\partial^k}{\partial x^k} z(0, y), (k = 0, 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

$$b_k = \frac{1}{k!} \frac{\partial^k}{\partial y^k} z(0, 0), (k = 0, 1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

(2) 비검체의 회전에 관한 가정 1

비검체의  $xy$  평면내에서의 회전 전후의 회전 중심의 차이는 매우 작아 무시할 수 있다고 가정한다.<sup>8,9</sup>

(3) 비검체의 회전에 관한 가정 2

비검면 형상을 기준 위치에서 각도  $\phi$  만 rotation shift 할때의 rotation shift 오차( $x$  축방향에의 기울기 성분을  $\eta(\phi)$ ,  $y$  축방향에의 기울기 성분을  $\zeta(\phi)$ , up and down movement 성분  $\tau(\phi)$ )를

$$I(\phi, x, y) = \eta(\phi)x + \zeta(\phi)y + \tau(\phi) \quad (5)$$

로 표현한다.

(4) 비검체의 linear shift 에 관한 가정

linear shift 에 수반하는 shift 오차는, shift 양  $\alpha, \beta$  에 대해서, pitching 오차  $p(\alpha, \beta)$ , rolling 오차  $r(\alpha, \beta)$ , up and down movement 오차  $g(\alpha, \beta)$  에 의해

$$\xi(\alpha, \beta, x, y) = p(\alpha, \beta)(x - \alpha) + r(\alpha, \beta)(y - \beta) + g(\alpha, \beta) \quad (6)$$

로 표현한다.<sup>6,7</sup>

(5) 비검체의 회전에 관한 가정

(linear shift 전후의 rotation shift 오차의 재현성)

Fig. 1 에서 표시하는 것처럼 linear shift 전후에 같은 각도  $\phi$  로 rotation shift 할 때의 rotation shift 오차 ( $x$  축과의 기울기 성분  $\eta(\phi)$ ,  $y$  축과의 기울기 성분  $\zeta(\phi)$ )가 linear shift 전후와 같다고 가정한다.

본가정이 본 논문에 있어서의 가장 중요한 가정이다. 그러나, 본가정은 실제의 회전 기구와, positioning stage 의 성능을 볼때 현실적인 가정이다.

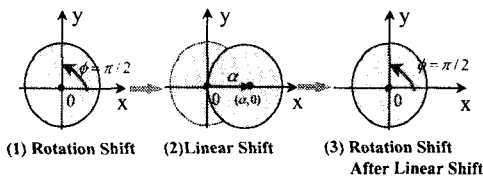


Fig. 1 Supposition(5)(The reproducibility of the rotation shift before and after a linear shift)

2.2 계통 오차 결정을 위한 시스템 구성

계통 오차를 포함하는 비검면 형상을 측정하는 시스템을 Fig. 2 로 표시한다.

본 시스템은 laser source 1, 간섭 무늬의 2 차원 화상을 촬영하는 CCD Camera 2, 참조면 3 등을 갖는 간섭 무늬 계측의 간섭계 시스템 5 와 비검체의 shift 를 위해서 설치된 1 차원 positioning stage 6 와 rotation shift 하기 위한 회전 기구 7 위에 있는 비검체 8 등에서 구성되어 있다.

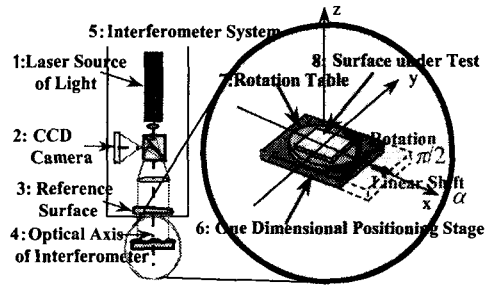


Fig. 2 System configuration for deciding the systematic error

Fig. 2 에서 1 차원 positioning stage 6 과 회전 테이블 7 위에 고정되어 있는 비검체 8 을 linear shift 시키거나 rotation shift 시켜 전체의 계통 오차를 포함하는 비검면 형상 데이터를 산출해서 비검면 형상을 결정한다.

즉, 비검체 8 의 기준 위치에서, 측정하여, 얻은 데이터로 전통적인 간섭 무늬 해석에 의해 계통 오차를 포함하는 데이터를 산출한다. 그리고, 회전 기구 7 을 이용해,  $\phi = \pi/2$  rotation shift 시켜, 위와 같은 방법으로, 계통 오차를 포함하는 비검면 형상 데이터를 산출한다(제 1 과정).

다음으로,  $\phi = 3\pi/2$  (또는,  $\phi = -\pi/2$ ) rotation shift 시켜, 기준 위치로 돌려, 비검체를  $x$  축의 정 방향으로 linear shift 시켜, 형상 데이터를 산출한다. 그리고,  $\phi = \pi/2$  rotation shift 시켜, 전기 형상 데이터를 산출한다(제 2 과정).

이 2 개의 과정을 통하여 획득한 복수의 비검면 형상 산출 데이터를 이용해서 본 논문의 알고리즘에 따라 비검면에 근사하는 다항식의 2 차 이상의 계수, 즉 linear shift 오차인 pitching 오차와, rolling 오차가 결정된다.

마지막으로 참조면 오차를 포함하는 계통 오차가 1 차 이하의 성분을 제외한 다항식에서 결정된 후, 실제의 비검면 형상 측정에서 비검체를 shift 시키는 필요도 없다. 따라서, 전술 1 차원 positioning stage 와 회전 기구도 필요없고 비검면의 계통 오차를 포함하는 형상 측정값을 이용해서 「측정값으로부터 도출된 계통 오차를 포함하는 형상 측정값」 - 「1 차 이하의 성분이 제외한 계통 오차」에 의해 비검면 형상의 고정밀도 측정이

실현된다.

### 2.3 비검체의 linear shift 에 수반하는 관계식

먼저  $z(x, y)$  는 비검면의 형상을 표시하며,  $\varepsilon(x, y)$  는 참조면 오차를 포함하는 계통 오차를 표시한다. (관측식(7)로부터 알수 있는대로  $\varepsilon(x, y)$  에 광학 부품에 의한 파면의 왜곡등을 포함하고 있다고 가정할수 있다.) 또,  $z(\alpha, \beta, x, y)$  는 linear shift 량  $\alpha, \beta$  에 대응하고 발생하는 linear shift 오차  $\xi(\alpha, \beta, x, y)$  와 계통 오차  $\varepsilon(x, y)$  를 포함하는 비검면 형상의 측정값을 표시한다. 더욱,  $z_{\pi/2}(\alpha, \beta, x, y)$  는 linear shift 후에,  $\pi/2$  rotation shift 하는 경우에는 linear shift 오차  $\xi(\alpha, \beta, x, y)$  , rotation shift 오차  $I(\phi, x, y)$  와 계통 오차  $\varepsilon(x, y)$  를 포함하는 비검면 형상의 측정값을 표시한다. 특히, 여기서는  $z(0, 0) = \varepsilon(0, 0) = 0$  로 가정한다.

각  $y = y_k (k=1, 2, \dots, m)$  에 대한,  $x$  의  $n$  차 다항식 계수 결정을 위해 먼저, 비검체의 shift 전 에 얻을 수 있는 계통 오차를 포함하는 비검면 형상  $z(0, 0, x, y)$  은, 아래식와 같이 표현된다.

$$z(0, 0, x, y) = z(x, y) + \varepsilon(x, y) \quad (7)$$

비검체를  $x$  축방향으로  $\alpha$  만 linear shift 해서 얻을 수 있는 관계식은

$$z(\alpha, 0, x, y) = z(x - \alpha, y) + p(\alpha, 0)(x - \alpha) + r(\alpha, 0)y + g(\alpha, 0) \quad (8)$$

로 표현된다.

여기서, 식(1), (7), (8)로부터,

$$\begin{aligned} & z(\alpha, 0, x, y) - z(0, 0, x, y) \\ &= \sum_{k=1}^n a_k(y)((x - \alpha)^k - x^k) + p(\alpha, 0)(x - \alpha) + r(\alpha, 0)y + g(\alpha, 0) \end{aligned} \quad (9)$$

가 성립된다.

### 2.4 비검체의 회전에 수반하는 관계식

비검체를 회전하기 위해서 비검면 형상  $z(x, y)$  을 극좌표로 표현한다. 좌표를 원점으로부터의 거리  $l$  과  $x$  축방향으로부터의 각도  $\theta$  (왼쪽 방향이 정방향)를 이용하여  $(l, \theta)$  로 표현하고, 비검면

형상  $z(x, y)$  를  $z(l, \theta)$  , 계통 오차  $\varepsilon(x, y)$  를  $\varepsilon(l, \theta)$  로 표시한다. 또한, 각도  $\phi$  만 회전 시킬 경우의  $(l, \theta)$  에 대한 측정 데이터를  $z(\phi, l, \theta)$  로 표현한다. 회전전의 관측식은 아래와 같이 된다.

$$z(0, l, \theta) = z(l, \theta) + \varepsilon(l, \theta) \quad (10)$$

이 때,  $\varepsilon(l, \theta)$  를 아래와 같이 Fourier 급수 전개한다.

$$\varepsilon(l, \theta) = \frac{\varepsilon_0}{2} + \sum_{m=1}^p \varepsilon^c_m \cos m\theta + \sum_{m=1}^p \varepsilon^s_m \sin m\theta \quad (11)$$

다음에, 비검체를 각도  $\phi$  만 회전 시킬 경우의 rotation shift 오차

$$I(\phi, x, y) = \eta(\phi)x + \zeta(\phi)y + \tau(\phi) \quad (12)$$

도 극좌표에서 표현하면, 회전 후의 관측식은 아래와 같은 식(13)이 된다.

$$z(\phi, l, \theta) = z(l, \theta - \phi) + \varepsilon(l, \theta) + \eta(\phi)l \cos(\theta) + \zeta(\phi)l \sin(\theta) + \tau(\phi) \quad (13)$$

여기서,  $z(l, \theta)$  는 비검면 형상의 반경  $l$  에 있어서의 원주상을 따른 형상을 표현하는 값이고, 각도  $\theta$  에 관한  $2\pi$  의 주기함수이다.

### 2.5 비검면 형상을 근사하는 다항식의 3 차 상의 계수 결정

이 다항식의 3 차 이상의 계수는

$$c(\alpha, 0, 0, y) = -2\alpha a_2(y) + p(\alpha, 0) \quad (14)$$

$$d(\alpha, 0, 0, y) = \alpha^2 a_2(y) - \alpha a_1(y) - \alpha p(\alpha, 0) + r(\alpha, 0)y + g(\alpha, 0) \quad (15)$$

로서, 식(10)로부터  $n+3$  개의 미지수

$a_k(y), \dots, a_3(y), c(\alpha, 0, 0, y), d(\alpha, 0, 0, y)$  을 얻을 수 있다.

### 2.6 2 차 이상의 계수의 차이 결정

(2.2)의 제 1 과정에서  $\pi/2$  회전 전후의 형상 산출 데이터를 이용해서 2 차 이상의 각 계수 차이  $a_k(0) - b_k (k \geq 2)$  를 결정 할 수 있다.

**2.7 Pitching 오차  $p(\alpha, 0)$ , rolling 오차  $r(\alpha, 0)$ 의 결정**

식(11)로부터 Cosine, Sine 에 관한 1 차 성분  $\varepsilon^c, \varepsilon^s$  을  $\pi l c(0, l), \pi l s(0, l)$  로 정의하면,

$$c(0, l) = \frac{1}{\pi l} \int_0^{2\pi} \varepsilon(l, \theta) \cos \theta d\theta \quad (16)$$

$$s(0, l) = \frac{1}{\pi l} \int_0^{2\pi} \varepsilon(l, \theta) \sin \theta d\theta \quad (17)$$

가 된다. 다음에, 비검체를 각도  $\phi$  만 회전 시킬 때 관측식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} z(\phi, l, \theta) \\ = z(l, \theta - \phi) + \varepsilon(l, \theta) + \eta(\phi)l \cos(\theta) + \zeta(\phi)l \sin(\theta) + \tau(\phi) \end{aligned} \quad (18)$$

원점을  $(\alpha, 0)$  로 평행 이동한 새로운 좌표계  $(x_\alpha, y)$  를 정의한다. 비검체를  $x$  축 정방향으로  $\alpha$  linear shift 한후, 비검면 형상은 신좌표  $(x_\alpha, y)$  를 이용해서,  $z(x_\alpha, y)$  로 표현할수 있다.

여기서, 신좌표계의 원점(전 좌표계에서는  $(\alpha, 0)$ )을 중심으로, 각도  $\phi$  만 rotation shift 시켜, 회전 전의 형상 데이터인  $z(x_\alpha, y)$  는 극좌표로서,  $z_\alpha(l, \theta)$  로, 그리고, 계통 오차  $\varepsilon(x_\alpha, y)$  도  $\varepsilon_\alpha(l, \theta)$  로 표현하면, 식(8)은,

$$\begin{aligned} z_\alpha(0, l, \theta) \\ = z_\alpha(l, \theta) + \varepsilon_\alpha(l, \theta) + p(\alpha, 0)l \cos \theta + r(\alpha, 0)l \sin \theta + g(\alpha, 0) \end{aligned} \quad (19)$$

가 된다. 또, 비검체를 각도  $\phi$  만 회전 시킬 경우의 관측식은, rotation shift 오차가 부가되어

$$\begin{aligned} z_\alpha(\phi, l, \theta) = z_\alpha(l, \theta - \phi) + \varepsilon_\alpha(l, \theta) + p(\alpha, 0)l \cos(\theta - \phi) \\ + r(\alpha, 0)l \sin(\theta - \phi) + g(\alpha, 0) + \eta_\alpha(\phi)l \cos(\theta) + \zeta_\alpha(\phi)l \sin(\theta) + \tau_\alpha(\phi) \end{aligned} \quad (20)$$

가 된다.  $\varepsilon_\alpha(l, \theta)$  도, 아래와 같이, Fourier 급수 전개한다.

$$\varepsilon_\alpha(l, \theta) = \frac{\varepsilon_{\alpha 0}}{2} + \sum_{m=1}^n \varepsilon_{\alpha m}^c \cos m\theta + \sum_{m=1}^n \varepsilon_{\alpha m}^s \sin m\theta \quad (21)$$

위와 같이,  $\varepsilon_\alpha^c, \varepsilon_\alpha^s$  를  $\pi l c(\alpha, l), \pi l s(\alpha, l)$  로 정의하면

$$c(\alpha, l) = \frac{1}{\pi l} \int_0^{2\pi} \varepsilon_\alpha(l, \theta) \cos \theta d\theta \quad (22)$$

$$s(\alpha, l) = \frac{1}{\pi l} \int_0^{2\pi} \varepsilon_\alpha(l, \theta) \sin \theta d\theta \quad (23)$$

가 된다. 여기서, 가정 2.1(5) 에 의해서, linear shift 전후의 비검체를 각각 각도  $\phi$  회전 시킬 경우의, 관측식 차이는 다음식와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} z_\alpha(\phi, l, \theta) - z(\phi, l, \theta) = z_\alpha(l, \theta - \phi) - z(l, \theta - \phi) + \varepsilon_\alpha(l, \theta) - \varepsilon(l, \theta) \\ + p(\alpha, 0)l \cos(\theta - \phi) + r(\alpha, 0)l \sin(\theta - \phi) + g(\alpha, 0) + \tau_\alpha(\phi) - \tau(\phi) \end{aligned} \quad (24)$$

식(24)에 1 차의 Cosine, Sine 에 관한 Fourier 변환을 하면,

$$\begin{aligned} \cos \phi p(\alpha, 0) - \sin \phi r(\alpha, 0) + c(\alpha, l) - c(0, l) \\ = \frac{1}{\pi l} \int_0^{2\pi} (z_\alpha(\phi, l, \theta) - z(\phi, l, \theta)) \cos \theta d\theta \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \sin \phi p(\alpha, 0) + \cos \phi r(\alpha, 0) + s(\alpha, l) - s(0, l) \\ = \frac{1}{\pi l} \int_0^{2\pi} (z_\alpha(\phi, l, \theta) - z(\phi, l, \theta)) \sin \theta d\theta \end{aligned} \quad (26)$$

가 된다. 따라서, 식(25)(26)의 좌변은  $\phi$  을 주면 결정되는 함수로서 아래와 같은식  $h_\eta(\phi), h_\zeta(\phi)$  로 정의한다.

$$h_\eta(\phi) = \frac{1}{\pi l} \int_0^{2\pi} (z_\alpha(\phi, l, \theta) - z(\phi, l, \theta)) \cos \theta d\theta \quad (27)$$

$$h_\zeta(\phi) = \frac{1}{\pi l} \int_0^{2\pi} (z_\alpha(\phi, l, \theta) - z(\phi, l, \theta)) \sin \theta d\theta \quad (28)$$

$\phi = 0, \pi/2$  라고 할 때, 식(25)(26)에서  $p(\alpha, 0), r(\alpha, 0)$  가 다음과 같이 결정된다.

$$p(\alpha, 0) = \frac{h_\eta(0) - h_\zeta(0) - h_\eta(\pi/2) + h_\zeta(\pi/2)}{2} \quad (29)$$

$$r(\alpha, 0) = \frac{h_\eta(0) + h_\zeta(0) - h_\eta(\pi/2) - h_\zeta(\pi/2)}{2} \quad (30)$$

### 2.8 2 차계수의 결정

2.7 절부터 pitching 오차, rolling 오차를 결정할 수 있다. 따라서, 식(14)에서 2 차계수는,

$$a_2(y) = \frac{p(\alpha, 0) - c(\alpha, 0, 0, y)}{2\alpha} \quad (31)$$

로서, 결정될 수 있고 2.6 절부터 2 차 계수  $b_2$  도 계산할 수 있다.

### 2.9 피검면 형상의 결정

2.8 절까지의 알고리즘으로부터, 피검면 형상의 계수 2 차 이상의 성분을 결정해왔다. 또, 1 차 계수에 관해서는, 식(15)으로부터

$$\begin{aligned} & a_1(y)x + b_1y \\ &= \frac{r(\alpha, 0)y + \alpha^2(a_2(y) - a_2(0)) - (d(\alpha, 0, 0, y) - d(\alpha, 0, 0, 0))}{\alpha} \\ &+ a_1(0)x + b_1y \end{aligned} \quad (32)$$

$$\begin{aligned} & a_1(y) \\ &= \frac{-d(\alpha, 0, 0, y) + \alpha^2 a_2(y) + r(\alpha, 0)y}{\alpha} + \frac{-\alpha p(\alpha, 0) + g(\alpha, 0)}{\alpha} \end{aligned} \quad (33)$$

가 된다. 여기서, 1 차 이하의 성분  $a_1(y)x + b_1y$  은, 와 같이 표현할 수가 있다. 우변 제 1 항는, 피검면의 형상에 있어서의  $xy$  에 관한 2 차 성분이다. 우변 제 2 항과 제 3 항은 피검체 표면의 형상의 1 차 성분이고, 기울기를 나타낸다.

따라서, 피검체 표면 형상의 기울기 성분을 제외한  $\bar{z}(x, y)$  은, 아래식으로 결정 할 수 있다.

$$\begin{aligned} \bar{z}(x, y) &= \sum_{k=2}^n a_k(y)x^k + \sum_{k=2}^n b_k y^k \\ &+ \frac{r(\alpha, 0)y + \alpha^2(a_2(y) - a_2(0)) - (d(\alpha, 0, 0, y) - d(\alpha, 0, 0, 0))}{\alpha} x \end{aligned} \quad (34)$$

### 2.10 계통 오차 $\varepsilon(x, y)$ 의 1 차이하의 성분을 제외한 부분 $\bar{\varepsilon}(x, y)$ 의 결정

계통 오차  $\varepsilon(x, y)$  는, 1 차 성분을 제외한 계통 오차와 1 차 성분로서 나타낼 수 있다.

$$\varepsilon(x, y) = \bar{\varepsilon}(x, y) + (ex + fy) \quad (35)$$

피검체의 shift 전의 계측값  $z(0, 0, x, y)$  로부터,

$$z(0, 0, x, y) - \bar{z}(x, y) = \bar{\varepsilon}(x, y) + \psi x + \kappa y \quad (36)$$

를 얻을 수 있기 때문에, 식(36)로부터, Least Square Method 등을 이용해서,

$$\begin{aligned} g(x, y) &= z(0, 0, x, y) - \bar{z}(x, y) \\ &= \bar{\varepsilon}(x, y) + \psi x + \kappa y \end{aligned} \quad (37)$$

의 1 차 성분  $\psi x + \kappa y$  을 결정해서,

$$\bar{\varepsilon}(x, y) = g(x, y) - (\psi x + \kappa y) \quad (38)$$

로서 계통 오차  $\varepsilon(x, y)$  의 1 차 성분  $\psi x + \kappa y$  을 제외한 부분  $\bar{\varepsilon}(x, y)$  이 결정할 수 있다.

### 2.11 임의 피검면의 형상 측정

센서의 계측값에서 얻을 수 있던 계통 오차를 포함한 임의 피검면의 형상  $z(x, y)$  의 산출값  $z(0, 0, x, y)$  과 이미 1 차의 성분을 제외해 측정된 계통 오차를 이용해서 임의 피검면 형상에 계통 오차의 1 차 성분을 포함한

$$\begin{aligned} h(x, y) &= z(0, 0, x, y) - \bar{\varepsilon}(x, y) \\ &= \bar{z}(x, y) + vx + wy \end{aligned} \quad (39)$$

에 대해서, Least Square Method 등을 이용해서, 1 차 성분  $\psi x + \kappa y$  을 구해, 1 차 성분을 제외한 임의 피검면의 형상  $\bar{z}(x, y)$  은

$$\bar{z}(x, y) = h(x, y) - (vx + wy) \quad (40)$$

로서, 계산할 수 있다.

### 3. 수치 실험

#### 3.1 수치 실험의 개요

2 장에서 설명한 알고리즘에 따라서, linear shift 전후의 회전 오차 재현성이 있다고 가정해서 다음의 3 과정을 거쳐 계통 오차의 1 차 성분을 제외한  $\bar{\epsilon}(x,y)$  와 임의 피검면의 형상  $z(x,y)$  의 1 차 성분을 제외한 형상  $\bar{z}(x,y)$  을 결정한다.

제 1 과정 피검면의 형상  $z(x,y)$  의 1 차 성분을 제외한  $\bar{z}(x,y)$  을 결정

형상 산출 데이터를 이용하여 본 알고리즘에 따라 pitching 오차, rolling 오차를 결정해서, 피검면의 형상의 1 차 성분을 제외한  $\bar{z}(x,y)$  를 계산한다.

제 2 과정 계통 오차  $z(x,y)$  의 1 차 성분을 제외한 형상  $\bar{\epsilon}(x,y)$  의 결정

제 3 과정 임의 피검면의 형상  $z(x,y)$  의 1 차 성분  $\bar{z}(x,y)$  을 제외한 형상의 결정

#### 3.2 수치 실험을 위한 가정

각 수치 실험을 하는 과정에 있어서, 측정 영역이나 참조면과 교정용 피검면의 형상, shift 오차의 하나의 예를 아래와 같이 가정한다.

간접계측에서는 계측대상면은 2.1(1)의 가정대로 매끄럽다는 전제가 있기 때문에, 여기서 2 차 이상의 다항식으로 근사한다. 그리고, shift 오차는 2 차선분에 영향을 주기 때문에, 외와 같은 가정을 한다. 또, 각 수치 실험용 shift 오차는 positioning stage 와 회전 기구의 성능에 따라서, 결정한다.

- (1) 참조면과 피검면의 크기(측정 영역) : 30 mm $\Phi$
- (2) CCD camera 계측 영역 : 500\*500(pixel) (1pxel=60  $\mu$ m 상당).
- (3) 교정용 피검면 및 계통 오차의 형상
  - (a) 형상의 단위 : (x,y) pixel, z(x,y) mm
  - (b) 설정에 : 교정용의 피검면, 참조면의 형상을 일례로서 각각 아래와 같은 5 차 다항식으로 표현한다.
- (I) 교정용 피검면의 형상 :

$$\text{Ref}(x,y) = 1/120 \times (1/(400 \times 600 \times 800)x^5 + 1/(400 \times 700) + (1/700)x^3 + x^2 + y^2 + 40x + 30y) \quad (41)$$

(II) 참조면오차를 포함한 계통 오차 :

$$\text{Test}(x,y) = -1/120 \times (1/(400 \times 500 \times 700)x^5 + 1/(400 \times 600)x^4 + (1/400)x^3 + x^2 + y^2 + 50x + 40y) \quad (42)$$

(4) Linear shift 오차 (pitching 오차, rolling 오차, up and down movement 오차).

Pitching 오차= rolling 오차= 0.06nm/pixel  
 $\approx 1\mu$  rad, up and down movement 오차= 150nm

(5) Rotation shift 오차

x 축에의 기울어 오차 = y 축에의 기울어 오차 = 0.18nm/pixel  $\approx 3\mu$  rad,  
 up and down movement 오차= 150nm

(6) Linear shift 양 : 40pixel

#### 3.3 수치 실험 결과

3.2 에서 계통 오차를 식(42)(Fig. 3 으로 표시) 그리고 교정용 피검면의 형상을 같은 식(41)로 가정한다(Fig. 4). 다음에 3.1 의 과정을 통해 결정된 교정용 피검면의 1 차 성분을 제외한 형상을 Fig. 5 로 표시하며, 계통 오차의 1 차성분을 제외한 형상을 Fig. 6 으로 표시한다. Table 1 에서는 교정용 피검면의 형상, shift 오차의 산출값과 그 오차값을 표시한다. Linear shift 에 수반해서 생기는 pitching 오차와 rolling 오차는 정확하게 계산되고 있다. 그렇기 때문에 교정용 피검면의 형상도 정확하게 계산되고 있다.

또, Fig. 7 에서는 임의 피검면의 형상의 예이고 1 차 이하의 성분을 제외해 계산된 계통 오차를 이용해서 산출하면 평균 오차는 0.03(nm) 이하로, 정확하게 계산된다(Fig. 8).

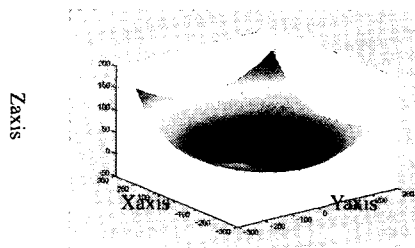


Fig. 3 An example of systematic error whose includes reference flat surface error

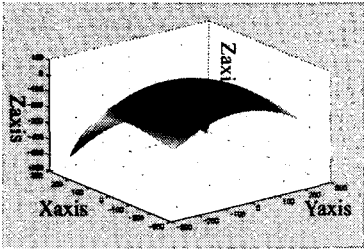


Fig. 4 An example of surface under test for calibration

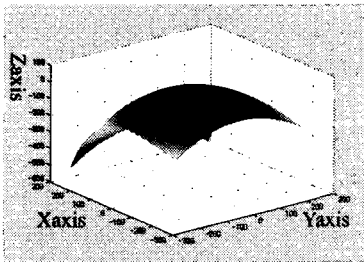


Fig. 5 The result of calculation 1: surface under test for calibration

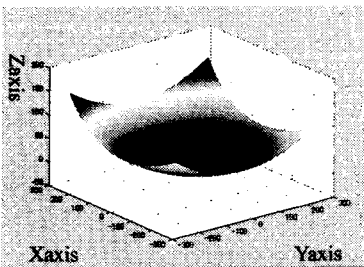


Fig. 6 The result of calculation 2: systematic error

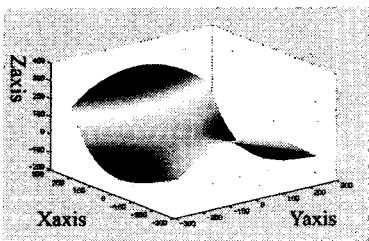


Fig. 7 An example of arbitrary surface under test

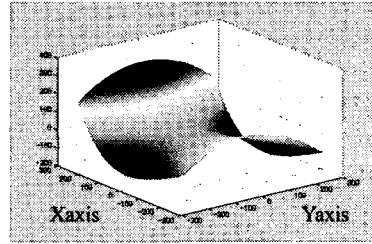


Fig.8 The result of arbitrary surface Fig. 7

Table 1 Calculated value of surface under test for calibration and shift errors

Item	Various Amounts	Input Value	Calculated Value	Error
Shift (pixel)	$\alpha$	40	—	—
Coefficient of Surface Under Test For Calibration	Fifth (x)	-1.79e-11	-1.79e-11	-6.27e-21
	Fourth (x)	-1.04e-08	-1.04e-08	7.65e-21
	Third (x)	-6.25e-06	-6.25e-06	8.49e-18
	Second (x)	-2.50e-03	-2.50e-03	-4.58e-07
	First (x)	-1.25e-01	—	—
	Fifth (y)	0.0	-7.54e-21	-7.54e-21
	Fourth (y)	0.0	2.20e-19	2.20e-19
	Third (y)	0.0	4.77e-18	-4.77e-18
	Second (y)	-2.500e-03	-2.50e-03	-4.58e-07
	First (y)	-1.000e-01	—	—
Shift Error (nm/pixel)	Pitching	6.00e-02	5.99e-02	-3.66e-05
	Rolling	6.00e-02	5.99e-02	-3.48e-05
	Up Down	1.500e+02	—	—

#### 4.1 계통 오차를 결정하는 알고리즘

본 논문에서는, 비검체의 rotation shift 와 linear shift 를 이용하는 간섭계의 계통 오차 결정의 새로운 알고리즘을 제안했다. 특히, linear shift 전후의 rotation shift 오차의 동등성이 있는 것을 가정했다.

본 방식을 이용하면 간섭계의 계통 오차가 특별한 교정용 비검면은 필요없다. 통상의 비검체를 positioning stage 와 회전 기구에 고정해서 복수의 비검체의 회전과 linear shift 에 의한 형상 측정계의 계통 오차를 포함하는 비검면 형상의 측정값만을 이용해서(다른 센서는 필요없음) 비검면 형상을 계산할 수 있다. 게다가, 계통 오차도 1 차 이하의 성분을 제외한 참조면을 결정할 수 있다.



## 4.2 계통 오차 결정하는 알고리즘의 타당성을 검증하는 수치 실험

비검체의 복수의 rotation shift 와 linear shift 를 이용하는 계통 오차 절감에 관한 알고리즘의 타당성을 검증하기 위해서 수치 실험을 했다.

수치 실험 결과 linear shift 오차인 pitching 오차와 rolling 오차는 정확하게 계산되어 있다. 따라서, 계통 오차도 일반 간섭계측과 같이 기울기 성분인 1 차 이하 성분은 미결정이지만 형상 성분은 정확하게 계산될 수 있는 것을 판명했다.

따라서 본 논문으로 말한 계통 오차 절감에 관한 알고리즘의 타당성이 수치 실험의 단계이지만 실증되었다.

## 4.3 향후의 전망

향후는 300mm $\phi$  실리콘 웨이퍼의 평탄도 검사 장치를 개발할 예정이며, 그 장치를 사용해서 본 논문의 알고리즘을 실제로 검증할 예정이다.

## 후 기

본 한국어의 논문을, 수정해 주셨던, (주)Design Mecha 의 과장 아즈마씨께 감사의 뜻을 표합니다.

## 참고문헌

- Oreb.Bozenko, F., "Calibration of a 300-mm-aperture phase-shifting Fizeau interferometer," Appl. Opt., Vol. 39, No. 28, pp. 5161-5171, 2000.
- Takatsuji, T., Ueki N., Hibino, K., Kurosawa T., "Japanese Ultimate flatness Interferometer and its preliminary experiment," Proc. of SPIE, May 2001.
- Schulz, G. and Schwider, J., "Precise Measurement of Planeness," Appl. Opt. 6, pp. 1077-1084, 1967.
- Fritz, B. S., "Absolute calibration of optical flat," Optical engineering, 23-4, pp. 379-383, 1984.
- Hariharan, P., "Interferometric measurements of deviations from flatness: some new techniques," SPIE Vol. 3479, pp. 1 - 13, 1998.
- Mercier, R., Lamare, M., Picart, P., Marioge, J. P., "Two-flat method for bi-dimensional measurement of absolute departure from the best sphere," Pure. Appl. Opt., 6, pp. 117-126, 1997.
- Kiyono, S., Gao, W., Seio, H., "Theoretical Study on Absolute Measurement Method of Surface Shape by Interferogram," Journal of Jpn. Soc. Prec. Eng., 64, pp. 1137-1145, 1998.
- Sonosaki, A., Iwata, K., Iwasaki, Y., "Profile Measurement with No Standard," Journal of Jpn. Soc. Prec. Eng., 63, pp. 129-133, 1999.
- Ito, T., Hinaji, T., Horiuchi, O., "High precision Flatness Measurement by Combing Two-Orientation method and Radial Shift Method," Journal of Jpn. Soc. Prec. Eng., 58, pp. 883-886, 1992.
- Fujimoto, I., "One Idea on the Reduction of Systematic Errors with Interferometer," Proc. of National Conf. of JSPE, pp. 89, 2000.