

VCM을 이용한 노광기용 정밀 레티클 스테이지의 저진동 제어시스템 개발

김문수⁺, 오민택⁺, 김정한*
(논문접수일 ***, 심사완료일 ***)

Design of the Low Hunting Controller for the Reticle Stage for Lithography

Mun-Su Kim⁺, Min-Taek Oh⁺, Jung-Han Kim*

Abstract

This paper presents a new design of the precision stage for the reticle in lithography process and a low hunting control method for the stage. The stage has three axes for X, Y, θ_z , those actuated by three voice coil motors individually. The designed reticle stage system has three gap sensors and voice coil motors, and supported by four air bearings and the forward/inverse kinematics of the stage were solved to get an accurate reference position. When a stage is in regulating control mode, there always exist small fluctuations(stage hunting) in the stage movement. Because the low stage hunting characteristic is very important in recent lithography and nano-level applications, a special regulating controller for ultra low hunting is proposed in this paper. Also this research proposed the 2-step transmission system for preventing the noise infection from environmental devices. The experimental results showed the proposed regulating control system reduced hunting noise as 35nm(rms) when a conventional PID generates 77nm(rms) in the same mechanical system. Besides the reticle stage has 100nm linear accuracy and 1 μ rad rotation accuracy at the control frequency of 8kHz.

Key Words : Reticle stage(레티클 스테이지), precision stage(초정밀 스테이지), lithographer(노광기), gap sensor(갭 센서), voice coil motor(보이스 코일 모터)

1. 서론

초정밀 스테이지는 현재 반도체나 평면 디스플레이 산업

현장에서 정밀 스캐너나 검사 장비 등에서 널리 쓰이고 있다. 특히 반도체의 집적도가 점점 커짐에 따라 이러한 스테이지들은 나노급의 위치 정밀도와 긴 이송거리 그리고 작

⁺ 서울산업대 산업대학원 메카트로닉스공학과

* 교신저자, 서울산업대학교 기계설계자동화공학부 정밀기계기술연구소 (hankim@snut.ac.kr)

주소: 139-743 서울시 노원구 공릉2동 172

은 사이즈가 요구되고 있다. 보통 이러한 서브 마이크로급 성능을 구현하기 위해서는 PZT(Piezo- Electric Transducer)가 많이 사용되는데, PZT는 매우 빠른 응답특성과 큰 스타팅 토크, 넓은 대역폭등의 장점을 가지고 있다⁽¹⁾. 그러나 단점으로 매우 작은 구동범위를 갖고 있기 때문에 이를 극복하기 위해서 Liu 등과 같이 VCM(Voice Coil Motor)과 PZT를 같이 사용한 정밀 위치 제어에 관한 연구들이 있었다⁽²⁾. 그러나 이러한 하이브리드 방식은 전체 시스템의 기구적 복잡성을 증가 시키고, 안정성을 떨어뜨리게 되어 산업 현장에서 단점으로 작용하게 된다.

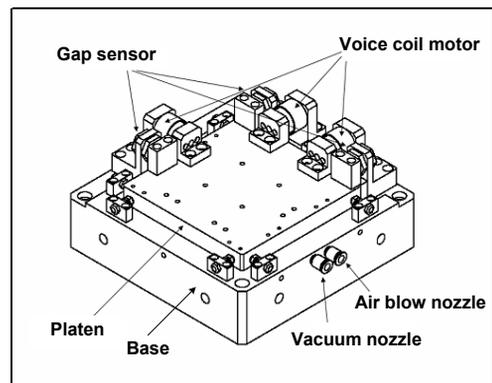
따라서 최근에는 VCM이나 리니어 모터를 이용한 다이렉트 드라이브 방식의 초정밀 스테이지에 관한 연구들이 많이 수행 되었다. Kim 등은 리니어 모터와 자기부상 구조를 이용한 6자유도의 노광기용 초정밀 스테이지⁽³⁾와 나노급의 다축 위치제어 시스템을 성공적으로 수행하였고⁽⁴⁾, Chen 등도 역시 자기 부상 구조를 이용한 3자유도 스테이지를 제안 하였다⁽⁵⁾. 또한 Gao 등은 서페이스(Surface) 모터와 특수한 광학 엔코더를 이용한 초정밀 스테이지를 연구하였으며⁽⁶⁾, Shinno 등은 VCM과 에어 베어링을 이용해 나노급 가공이 가능한 고 강성 모션 테이블을 설계하였다⁽⁷⁾. 이러한 스테이지들의 공통점은 구동 테이블을 에어나 자기력을 이용해 부상시켜 다이렉트로 구동함으로써 마찰로 인한 스테이지의 변형과 비선형성을 없애고 기구부의 구조를 단순화 시켰다는 것이다.

노광기안의 레티클 스테이지(reticle stage)는 이미지 광학계와 조면계 사이에 장착되는 장치로서 매우 정교하게 제어 되어야 광축과 반도체의 패턴 마스크가 잘 정렬 되어 우수한 노광 결과를 얻을 수 있다. 일반적으로 노광 시간은 몇 백 msec정도 걸리므로, 그 시간동안의 낮은 제어진동(fluctuation)이 레티클 스테이지에서 가장 중요하게 요구되는 문제이다. 스테이지 헌팅(hunting)이라고 불리우기도 하는 레귤레이션 모드에서의 제어 진동은 노광작업의 해상도가 정밀해질수록 큰 장애물이 되며, 노광 결과에 지대한 영향을 미친다.

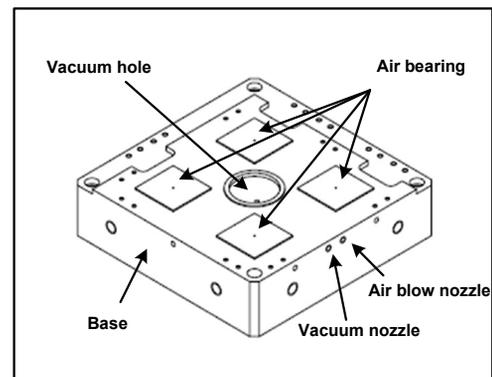
본 연구에서는 3개의 VCM과 갭 센서 그리고 에어 베어링을 이용해 X-Y- θ_z 3자유도를 갖는 스테이지를 설계하고, 제어 진동을 최소화 할 수 있는 스위칭 모드 제어기와 2단 전송시스템을 제안하여 일반적인 구조의 PID 제어기 보다 현저히 낮은 스테이지의 제어 진동 성능과 일반 구동시 고성능 제어를 동시에 구현함으로써 저진동 고성능의 보다 긴 구동범위를 갖는 스테이지의 제어 시스템을 설계 하였다.

2. 스테이지 설계

Fig. 1 (a)에서와 같이 본 논문에서 제안된 스테이지는 3개의 VCM과 3개의 정밀 갭 센서 그리고 4개의 에어 베어링으로 구성되어 있다. 3개의 VCM은 구동 테이블(Platen)에 직접 연결되어 있으며, 갭 센서는 VCM옆에 위치한다. 이러한 구동 테이블의 두변만을 사용한 기구부의 설계를 통해 넓은 스테이지 공간과 단순한 시스템 구조를 실현하였다. 또한 Fig. 1 (b)와 같이 에어베어링의 공압 노즐(Air blow nozzle)과 진공 노즐(Vacuum nozzle)은 베이스(Base)부에 설치하여 구동 테이블을 공압으로 띄우는 메카니즘을 사용하였다. 이는 공압 노즐을 구동 테이블에 설치하는 메카니즘에 비해 구동 테이블이 에어 튜브에 의하여 받는 영향을 없앨 수 있는 장점이 있다.



(a) Overall assembly drawing



(b) Base part drawing

Fig. 1 Design of the proposed stage

2.1 스테이지의 구동

스테이지를 제어하기 위해서는 정확한 구동 원리를 알아야 한다⁽⁸⁾. Fig. 2는 제안된 스테이지의 움직임에 대한 개념도이다. X축 방향의 직선운동을 위해서 VCM A를 구동하고, Y축 방향의 직선운동을 위해서는 VCM B, VCM C를 같은 방향으로 구동한다. 또한 회전 운동을 위해서는 VCM B와 VCM C, VCM A가 Fig. 2에서와 같이 각각의 방향으로 구동된다.

이와 같이 모든 스테이지의 운동은 3개의 VCM의 조합에 의해서 만들어지므로 이에 따른 정기구학과 역기구학을 구하여 식 (1)~(10)에 정리하였다.

2.2 스테이지의 기구학적 해석

정기구학 (G_a, G_b, G_c 가 주어졌을 때)

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{G_b - G_c}{x_C - x_B} \right) \quad (1)$$

$$T_x = \frac{G_a - G_{ae} + (G_b - G_{be}) \tan \theta}{1 + \tan^2 \theta} \quad (2)$$

$$T_y = \frac{G_b - G_{be} + (G_a - G_{ae}) \tan \theta}{1 + \tan^2 \theta} \quad (3)$$

where,

$$G_{ae} = -l_2 \cos \theta - (y - y_s) \sin \theta + x_s \quad (4)$$

(where, $y = (y_A + l_2 \sin \theta) \sec \theta + (1 - \sec \theta) y_s$)

$$G_{be} = -l_1 \cos \theta + (x_s - x) \sin \theta - y_s \quad (5)$$

(where, $x = (x_B + l_1 \sin \theta) \sec \theta + (1 - \sec \theta) x_s$)

역기구학 (T_x, T_y, θ 가 주어졌을 때)

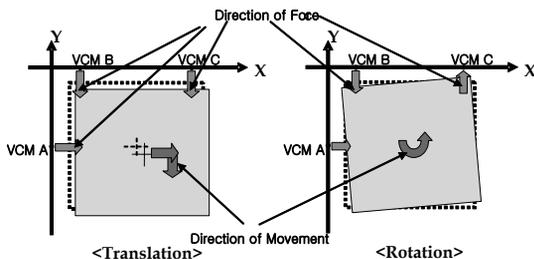


Fig. 2 Principle of the movement

$$G_a = (y_{D'} - y_A) \tan \theta + x_{D'} \quad (6)$$

$$G_b = (x_{E'} - x_B) \tan \theta - y_{E'} \quad (7)$$

$$G_c = (x_{E'} - x_C) \tan \theta - y_{E'} \quad (8)$$

where,

$$x_{D'} = -l_2 \cos \theta - (y_A - y_s) \sin \theta + x_s + T_x$$

$$y_{D'} = -l_2 \sin \theta + (y_A - y_s) \cos \theta + y_s + T_y \quad (9)$$

$$x_{E'} = (x_B - x_s) \cos \theta - l_1 \sin \theta + x_s + T_x$$

$$y_{E'} = (x_B - x_s) \sin \theta + l_1 \cos \theta + y_s + T_y \quad (10)$$

Fig. 3은 기구학 해석을 위한 좌표계로써, 점 A, B, C는 각각의 갭 센서의 측정점을 의미하며 점 S는 구동 테이블의 중점을 나타낸다. θ 는 회전 각도이며, T_x, T_y 는 구동 테이블

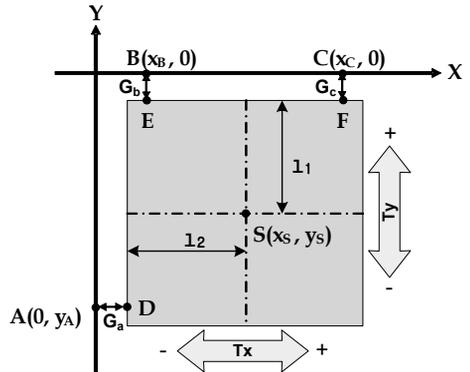


Fig. 3 System coordinate

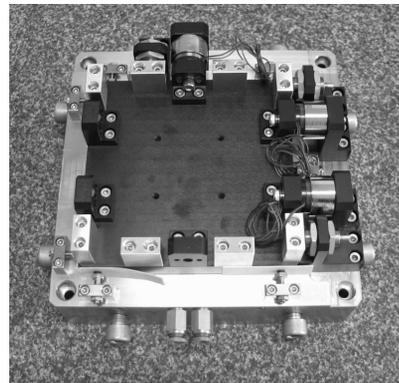


Fig. 4 Fabricated reticle stage

의 직선 이동거리를 나타낸다. G_i 는 각각의 갭 센서 i와 구동 테이블 사이의 거리를 의미한다. 식 (1-3)은 갭 센서의 거리 G_i 로부터 계산되며, 식 (4-5)는 회전에 의해 발생하는 센서 각각의 축 방향 직선운동 변위를 구한 것이다. 식 (6-8)은 목표 위치로 스테이지를 제어하기 위한 갭 센서의 기준 값이 된다. 식 (9-10)은 T_x, T_y, θ_z 가 주어질 때, 회전운동과 직선 운동에 의해 스테이지가 이동한 후 구동 테이블 좌변위의 임의의 점 D' 이 센서 A의 측정선 상에 올라갔을 때의 좌표를 구하는 식과 구동 테이블 상변위의 임의의 점 E' 이 센서 B의 측정선 상에 올라갔을 때의 좌표를 구하는 식이다. Fig. 4는 실제 제작된 스테이지의 모습이다.

3. 제어 알고리즘

전반적인 제어시스템은 다음과 같다. 스테이지의 목표 위치 T_x, T_y, θ_z 가 주어지면 DSP에서 목표 위치로 가기 위한 커플링 된 각 센서의 변위 G_a, G_b, G_c 를 식 (6)~(8)을 통해 구하고, 이 값을 기준으로 피드백 된 실제 각 센서의 출력과 비교하여 에러를 만든다. 이때 스위치 모드 제어기는 에러를 입력 받아 각 VCM을 제어하기 위한 출력을 생성하고, 3개의 VCM 드라이버가 스위치 모드 제어기의 출력을 받아 각 VCM을 구동하여 스테이지를 목표 위치로 이동 시킨다

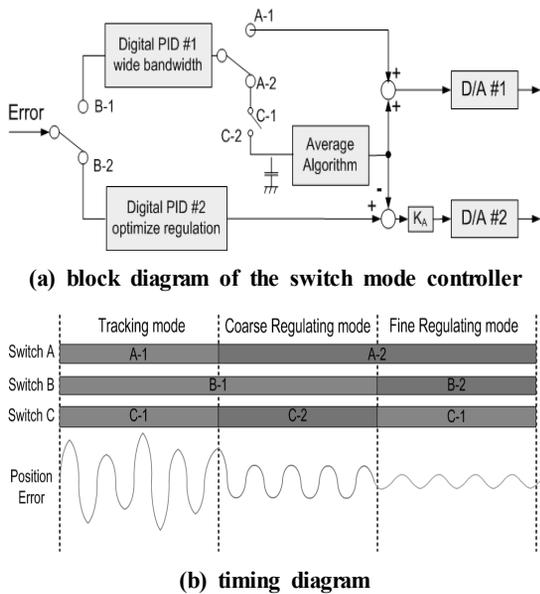


Fig. 5 Concept of switch mode algorithm

(Fig. 5-(a), Fig. 7 참조). 또한, 스테이지의 기구학이 센서의 위치를 기준으로 풀이 되었기 때문에 VCM의 위치가 센서의 위치와 동일하지 않아도 스테이지를 목표위치로 제어 할 수 있게 된다.

3.1 스위치 모드 제어 알고리즘

레티클 스테이지의 레귤레이션 상태에서의 작은 스테이지 진동은 노광 과정에서 가장 중요한 성능이다. 구동 테이블을 진동시키는 가장 큰 원인은 피드백 루프내의 센서 노이즈와 A/D, D/A의 양자화(quantization) 에러 및 전송 노이즈 등이다. 이러한 종류의 원인에 의한 진동은 시스템의 대역폭을 줄이는 등의 최적화 통하여 줄일 수 있으나, 대신 시스템의 동적 성능이 줄어드는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 제어 진동을 크게 감소시키면서도 일반 구동시 성능저하를 제거할 수 있는 스위치 모드 제어 알고리즘과 2단 전송장치를 제안하였다.

스위치 모드 제어 알고리즘은 일반 구동과 정밀 레귤레이션 제어모드를 구분하여 각각의 특성에 맞는 최적의 제어 파라미터를 사용하며, 정밀 레귤레이션 제어모드에서는 출력되는 실제 제어값의 평균치를 측정하여 미세 제어 출력값을 계산 및 2단 전송함으로써 제어진동을 최소화하여 노광 작업시 필요한 저진동 특성을 달성할 수 있도록 설계하였다.

Fig. 5의 (a)는 스위칭 모드 제어 알고리즘의 블럭선도를 도시한 것이다. 스위치 모드 제어 알고리즘의 동작은 Fig. 5의 (b)에서와 같이 크게 3단계모드로 나누어지는데, 먼저 추종 모드(tracking mode)에서는 Fig. 5 (a)의 스위치 A-1, B-1, C-1의 ON상태가 되어 넓은 대역폭을 가진 디지털 PID 제어기 #1을 사용해 목표 위치를 빠르게 추종한다. 그 후 스테이지가 목표치에 도달하여 정상 상태가 되면 스위치 A-2, C-2가 ON되어 정해진 시간의 출력값을 측정하여 평균치를 구하여 저장한다(coarse regulating mode).

평균값이 구해지면 스위치 B-2, C-1이 ON되어 D/A #1은 1차 레귤레이팅 모드(coarse regulating mode)에서 계산한 평균값을 출력하고, D/A #2는 디지털 PID 제어기 #2에서 계산된 최적 레귤레이션 값과 D/A #1으로 출력되는 평균값과의 차이를 구하고, 이 값을 계인 K_A 만큼 증폭하여 출력한다. 이러한 방법을 통하여 2개의 D/A를 사용하여 하나는 정밀 제어시의 평균값을 전송하며, 나머지 하나의 D/A는 미소한 제어량을 K_A 배 만큼 증폭하여 전송함으로써 전송시 발생하는 노이즈의 감염을 최소화한다.

이러한 구조를 통하여 저진동에 적합한 대역폭이 낮은 최적 제어기의 출력을 미소한 제어량까지 손실 없이 전송하여

사용할 수 있게 되므로 레티클 스테이지의 제어 진동을 줄여 주어 정밀 노광 공정에 적합한 제어를 할 수 있게 된다.

Fig. 6은 넓은 대역폭을 가진 디지털 PID 제어기 #1과 정밀 제어를 위한 디지털 PID 제어기 #2를 각각 사용했을 때 각각의 전체 피드백 보드선도 중 크기(magnitude) 그래프이다. 일반적인 구동시에는 제어 밴드폭이 넓은 제어기를 사용하여 빠른 정착(settling) 성능을 유도하며⁽⁹⁾, 정밀 레굴레이션 제어모드에서는 저진동 제어에 최적화된 저대역폭 제어기를 사용하며, 제어 출력값에서 평균치를 측정하여 미소 제어량을 추출해 내어, 이를 2단 전송시스템을 사용하여 손실 없이 전류제어기로 전송해 준다.

3.2 2단 전송 시스템

제어시 발생하는 스테이지 진동의 큰 원인중 하나는 DSP 제어기와 VCM 드라이버 사이의 신호 전송에서 발생하는 전자기적 노이즈이다. 보통 노광기등의 장비 안에는 모터와 슬레노이드 스위칭 모드 파워 등 많은 노이즈 소스들이 존재한다. 따라서 본 논문에서는 미소한 아날로그 신호를 큰 손실 없이 전송할 수 있는 2단 전송 시스템을 제안하여 앞서 제안한 스위칭 모드 제어기에 응용하여 노이즈가 제어신호에 미치는 영향을 최소화 하였다. 전송선 주위 및 GND등에 일정한 노이즈가 존재할 때, 미세한 전류 제어를 위한 작은 신호는 해당 노이즈에 큰 영향을 받는다. 그러나 Fig. 7에서와 같이 D/A #2에서 출력되기 전 평균값을 제거한 작은 전류제어 신호를 추출하여 증폭하여 전송하면 S/N 비가 커지므로 주위의 전기적 노이즈에 더욱 강인한 특성을 갖게 된다⁽¹⁰⁾.

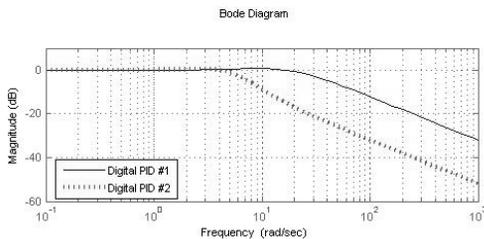


Fig. 6 Effect of switch mode algorithm

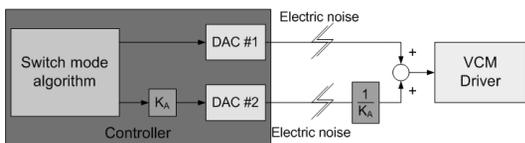


Fig. 7 Concept of two-port transmission system

본 논문의 시스템에서 Fig. 7의 K_A 값은 D/A의 출력 범위 제한을 고려하여 10으로 설정하였으며, 이러한 경우 일반 전송시와의 S/N 비의 차이는 20dB로, 다음과 같이 계산된다.

$$S/N \text{ Ratio} = 20\log(V_s / V_n) \quad (11)$$

$(V_s: \text{signal}, V_n: \text{noise})$

이므로,

$$20\log\left(\frac{10 \times V_s}{V_n}\right) - 20\log\left(\frac{V_s}{V_n}\right) = 20 \text{ (dB)} \quad (12)$$

VCM 드라이버는 전류제어기가 포함된 PAM(Pulse Amplitude Modulation)방식을 사용하였고⁽¹¹⁾, VCM 드라이버의 입력단에 D/A #2의 증폭되어 전송된 신호를 다시 원신호로 복원하는 회로를 포함하고 있다.

4. 실험 및 고찰

4.1 시스템 구성

제어용 DSP로는 TMS320F2812 사용하여 스테이지를 제어하고 역기구학을 계산하였으며, 16bit A/D 변환기로 센서 출력을 샘플링하고, DSP 제어기의 출력에는 16bit D/A 변환기를 사용하였다. 깎 센서는 분해능 0.1 μm 의 와전류 방식을 사용 하였다.

실험을 위해 에어 댐핑 시스템을 갖춘 광학정반을 사용하여 건물의 진동을 차단하였으며, 변위 및 각도 측정에는 1 nm의 linear 분해능과 1 μdeg 의 angular 분해능을 갖고 있는 레이저 인터페로미터를 사용하였다. Fig. 8은 레이저 인터페로미터를 이용한 시스템의 성능 측정 실험사진이다.

4.2 진동 특성 실험 결과

Fig. 9는 스테이지의 레굴레이션 모드에서의 진동(hunting)

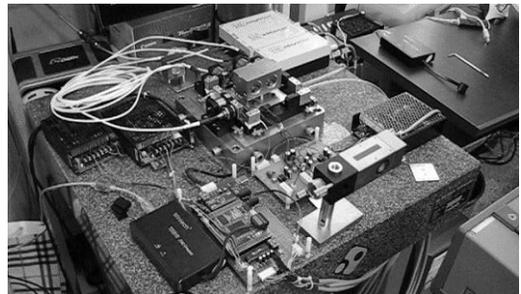


Fig. 8 Photograph of the experiment system

특성을 측정한 결과이다. Fig. 9의 첫 번째 그래프는 광학 정반 자체가 갖고 있는 기본 진동이며, 두 번째 그래프는 일반적인 PID 제어를 사용한 레귤레이션 모드에서 나타난 진동 특성으로 p-p 값은 약 $\pm 0.2\mu\text{m}$ 이다. 마지막 그래프는 본 연구에서 제안한 스위치 모드 알고리즘과 2단 전송 시스템을 사용하여 제어했을 때의 스테이지 진동 특성 그래프로 p-p 값이 약 $\pm 0.1\mu\text{m}$ 로 스테이지의 진동이 PID 제어기만을 사용했을 때 보다 훨씬 줄어든 것을 확인 할 수 있다.

Table 1은 상기의 두 경우의 에러의 RMS 값을 구한 것으로, 일반적인 PID 제어기보다 본 논문에서 제안된 스위칭 모드 제어 알고리즘이 스테이지의 진동을 46.3%나 감소시킨 것을 알 수 있다.

4.3 위치 정확도 실험 결과

스테이지의 전체적인 성능을 측정하기 위하여 레이저 인터페로미터를 사용하여 각축의 이동에 따른 에러를 측정하였다. Fig. 10은 스테이지의 전 구동 범위에 대한 목표 위치 에러를 나타낸다. 각각의 최대 위치 에러는 X축 $3\mu\text{m}$, Y축 $7\mu\text{m}$, θ_z 는 4×10^{-3} deg이다. 이러한 에러는 여러 가지 요인

Table 1 RMS value of PID and switch mode control

Control	RMS(Unit: nm)
PID controller	77.23
Switch mode control	35.76

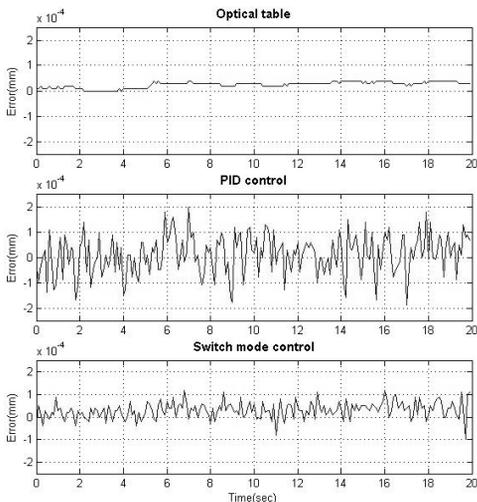
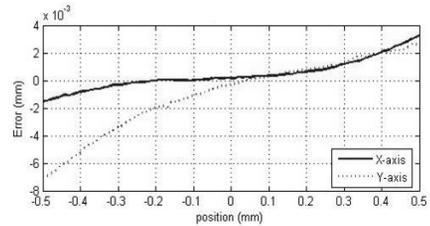


Fig. 9 Stage fluctuation characteristics(regulation mode)

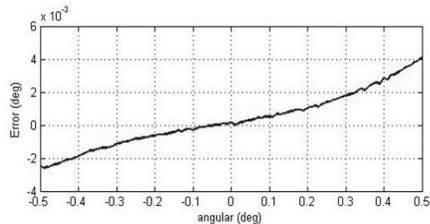
의 복합적 결과인데 가장 큰 원인들은 다음과 같다.

- * 갭 센서의 비선형성 및 개별특성
- * 기구의 가공 오차
- * DSP의 계산 오차
- * 온도나 습도 등의 환경 변수

여기서 가장 중요한 센서의 특성이나 기구의 가공 오차는 대량 생산시 제품의 개별적인 특성을 가지며 반복적인 특징을 가지고 있으므로, 본 연구에서는 Fig. 11에 도시된 것처럼 기준 위치(target position)에 추정된 에러를 직접 보상해주는 맵핑 알고리즘을 사용하여 스테이지의 위치정확도를 보상하였다. 맵핑 알고리즘은 시스템 전체 조립 후 스테이지가 가지고 있는 반복적인 에러를 측정하여 이를 모델링하여 이를 메모리안에 테이블로 보관하고, DSP안에서 제어 목표



(a) Linear position error



(b) θ_z position error

Fig. 10 Positioning error without mapping algorithm

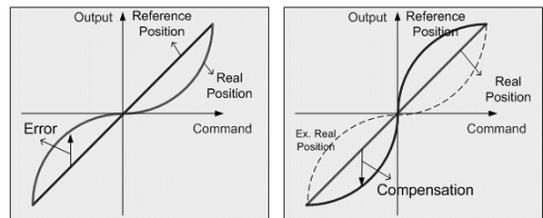
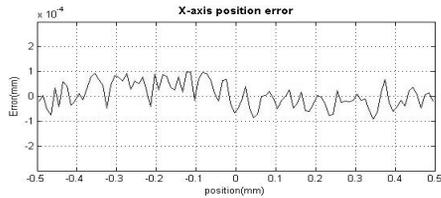
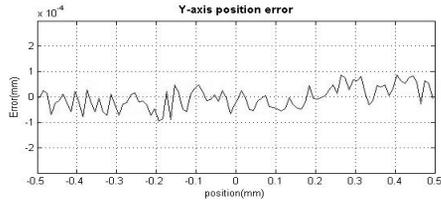


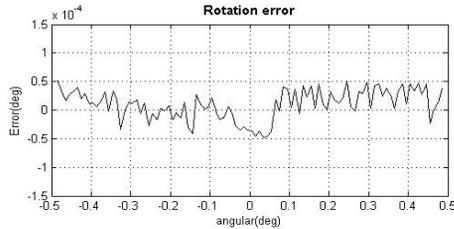
Fig. 11 Concept of mapping algorithm



(a) X-axis position error



(b) Y-axis position error



(c) θ_z position error

Fig. 12 Positioning error X, Y, θ_z

치 설정시 이를 보정해주는 방법이며, 실제로 정밀 반도체 장비 생산시 많이 응용되고 있는 방법이다.

Fig. 12는 맵핑 알고리즘을 사용하여 보상된 각축의 위치에 따른 레귤레이션 상태에서의 에러를 나타낸다. 스테이지의 X, Y축 최종 위치 정확도는 $\pm 0.1\mu\text{m}$ 이며, θ_z 의 정확도는 $\pm 57\mu\text{deg}(1\mu\text{rad})$ 로 측정되었다. X축과 Y축의 실험은 $-0.495\text{mm} \sim +0.495\text{mm}$ 까지 0.01mm 씩 움직이도록 스텝 형태의 입력을 주었으며, θ_z 는 $-0.485\text{deg} \sim +0.485\text{deg}$ 까지 0.01deg 씩 움직이도록 스텝 형태의 입력을 주었다.

4. 결론

본 논문은 세 개의 VCM을 사용하여 X, Y, θ_z 3자유도를 갖는 나노미터급의 정밀 스테이지의 저진동 제어에 대한 연구를 수행하였다. 설계된 스테이지는 에어 베어링으로 구동 테이블을 띄워서 마찰력을 없애고, VCM을 이용한 다이렉트 드라이브 방식을 사용하였으며, 와전류 방식 변위센서를

사용하여 단순하고 안정적인 구조를 실현하였다. 또한 제어시 진동을 최소화 하기위한 스위치 모드 알고리즘과 2단 전송 시스템을 제안 및 실험하였다.

제안된 스위칭 모드 제어 알고리즘은 각각의 VCM에 2개의 PID제어기를 사용하여 일반 구동모드와 정밀 레귤레이션 모드에 각각 적합하도록 설계하였고, 정밀 레귤레이션 모드에서는 현재 제어 출력값의 평균치를 측정하여 미소 제어량을 추출하여 이를 2단 전송시스템으로 전송함으로써 전송시 발생하는 노이즈를 억제하고 제어시 발생하는 진동을 최대한으로 억제함으로써 정밀한 노광작업에 필요한 저진동 제어 정밀도를 확보하였다. 실험 결과 스테이지의 진동 특성을 77nm(RMS) 에서 35nm(RMS) 로 46% 향상 시킬 수 있었으며 전 구동범위에서 스테이지의 X, Y축 위치 정확도는 $\pm 0.1\mu\text{m}$, θ_z 의 위치 정확도는 $\pm 57\mu\text{deg}(1\mu\text{rad})$ 를 실현하였다.

후기

이 논문은 2007년도 산자부 성장 동력 사업(대면적 고해상도 노광기 개발을 위한 나노급 요소기술 개발)의 지원에 의하여 연구되었음.

참고 문헌

- (1) Oh, H. S., Lee, S. J., Choi, S. C., Park, J. W. and Lee, D. W., 2007, "Behavioral Characteristics of Nano-Stages According to Hinge Structure," *Journal of the KSMTE*, Vol. 16, No. 3, pp. 23~30.
- (2) Liu, Y. T., Fung, R. F. and Wang, C. C., 2005, "Precision position control using combined piezo-VCM actuators," *Precision Engineering*, Vol. 29, pp. 411~422.
- (3) Kim, W. J. and Trumper, D. L., 1998, "High precision magnetic levitation stage for photolithography," *Precision Engineering*, Vol. 22, No. 2, pp. 66~77.
- (4) Kim, W. J., Verma, S. and Shakir, H., 2007, "Design and precision construction of novel magnetic-levitation-based multi-axis nanoscale positioning systems," *Precision Engineering*, Vol. 31, pp. 337~350.
- (5) Chen, K. S., Trumper, D. L. and Smith, S. T., 2002, "Design and Control for an electro - magnetically driven X-Y- θ stage," *Precision Engineering*, Vol. 26, pp. 355~369.

- (6) Gao, W., Dejima, S., Yanai, H., Katakura, K., Kiyono, S. and Tomita, Y., 2004, "A surface motor-driven planar motion stage integrated with an XY surface encoder for precision positioning," *Precision Engineering*, Vol. 28, pp. 329~337.
- (7) Shinno, H., Yoshioka, H. and Taniguchi, K., 2007, "A Newly Developed Linear Motor-Driven Aerostatic X-Y Planar Motion Table System for Nano-Machining," *Annals of the CIRP*, Vol. 56, pp. 369~372.
- (8) Lee, K. W., Lee, M. G., Lee, J. W., Lim, S. H., Shin, D. H., Jang, S. Y., Jeong, J. I. and Yim, H. J., 2007, "Dynamic Analysis of a Nano Imprinting Stage Using CAE," *Journal of the KSMTE*, Vol. 16, No. 5, pp. 211~217.
- (9) Kim, J. H., 2005, *Precision Displacement Control of VCM with Compensator for Non-linearity of Force According to Position*, Master's thesis, Pusan Nation University.
- (10) Mardiguian, M., 2000, *EMI Troubleshooting Techniques*, McGraw-Hill, New York, pp. 29~90.
- (11) Sriyotha, P., Nakamoto, K., Sugai, M. and Yamazaki, K., 2006, "Development of 5-Axis Linear Motor Driven Super-Precision Machine," *Annals of the CIRP*, Vol. 55.