

이 논문은 1992년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음.
 <논문> SAE NO. 943728

초정밀 위치결정을 위한 6자유도미동기구의 궤적특성에 관한 연구

A Study on Trajectory Characteristics of the Six-Degrees-of-Freedom Fine Motion Mechanism for the Ultra Precision Positioning Decision

김 재 열,* 윤 성 운**
 J. Y. Kim, S. U. Yoon

ABSTRACT

The purpose of this research is to examine precise linear motion and rotary motion. A six-degrees-of-freedom fine motion mechanism is introduced to drive an object precisely in directions of X, Y and Z-axes and around them : three rectangular linear motion and rotary ones. An experimental mechanism is introduced in which a $70 \times 70 \times 70 \text{ (mm}^3\text{)}$ cube object is driven by six PZT actuator.

The study is to establish the six-degrees-of-freedom fine motion mechanism of linear motion and rotary motion using PZT actuator.

주요기술용어 : Six-Degrees-of-Freedom Mechanism(6자유도미동기구), Trajectory Characteristics(궤적특성), Position Control(위치결정), Linear Motion(직선운동), Rotary motion(회전운동), Rotary Motion(회전운동), PZT Actuator(압전액츄에이터)

기 호 설 명

<p>C : Damping coeff. of the actuator compo.(Ns/m)</p> <p>C_1 : Damping coeff. of the hinge mech.(Ns/m)</p> <p>E : Young's modulus(N/m^2)</p> <p>I : Moment of inertia of the object(Nm)</p> <p>K : Spring coeff. of the actuator compo.(N/m)</p> <p>K_1 : Spring coeff. of the hinge mech.(N/m)</p> <p>M : Mass of the object(kg)</p> <p>T_p : Time const. of the actuator(s)</p> <p>d_{33} : Piezoelectric constant(m/volt)</p>	<p>k_s : Sensor gain($\text{v}/\mu\text{m}$)</p> <p>k_p : Actuator gain($\mu\text{m}/\text{v}$)</p> <p>ΔL : Displacement quantity of total(μm)</p> <p>Δt : Displacement quantity(μm)</p> <p>ζ_0 : Damping ratio of the actuator</p> <p>η_0 : Coeff. of lead element of the actuator(s)</p> <p>ω_0 : Natural freq. of the actuator(rad/s)</p>
<p>1. 서 른</p>	
<p>최근들어 압전소자로 만들어진 Actuator를 이 용한 초정밀위치결정 장치가 개발되고 실재산업</p>	

* 정회원, 조선대학교 공과대학 정밀기계공학과

** 정회원, 조선대학교 공과대학 기계공학과

에 이용하기위한 노력이 계속되고 있다. 예를들면 반도체 제조 장치의 일부인 웨이퍼밀의 테이블의 미세위치결정에 사용하는 것으로써 0.02 μm 이상의 고분해능을 가능하게 하였다.¹⁾ 또한 초정밀 가공기의 공구미동대에 사용하여 0.002~0.02 μm 의 고분해능 미동을 가능하게 하였다.²⁻⁴⁾ 뿐만 아니라 로버트산업에 있어서도 위치제어 능력을 갖고 있으면서 고정도 작업을 할수있도록 로버트 Arm 부분의 고정도 위치 자세제어에 응용하고, 또한 STM이나 광축침을 이용한 초정밀 미세 3차원 형상측정분야나 차량의 경우 요철이 심한 지면을 주행할 때 차량의 승차감 향상과 적재한 짐의 안전을 위해서 다양한 방향의 차체진동을 완화하는 등의 다양한 분야에 응용이 가능하리라 본다.

이와같은 고분해능의 미동을 제어하는데는 PZT Actuator를 이용하여 실시하고 있다. 종래에는 Stepping Motor등의 전자 Motor를 이용한 위치결정 기구가 많이 사용되었으나 이는 0.1 μm 이하의 고분해능과 고정도화를 실현하는데는 어려움이 많았다.

그래서 0.01 μm 이하의 변위를 쉽게 제어할 수 있는 전기-기계변환소자인 압전소자(PZT) Actuator를 이용한 미세면위제어에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다.

특히 반도체 제조장치의 마스크와 웨이퍼의 위치결정 테이블에 대한 연구가 Yamazaki와 D.C. Flanders에 의해서 연구보고가 되었다.⁵⁻⁶⁾ 이처럼 PZT Actuator를 이용한 미세위치결정에 대한 연구는 매우 광범위하게 응용할 수 있으며 연구도 끊임없이 진행되고 있다.

그러므로 본 연구에서는 이미 제작된 6자유도 미동기구를 이용하여 병진 2방향으로나 회전방향으로 동시에 Step 입력을 가하는 실험을 통하여 궤적특성에 관하여 고찰하고 이기구의 성능을 재검토하고자 한다.

본 연구에 사용한 기구는 원리적으로 정적 혹은 동적간섭이 없는 기구를 이용한 것이다.

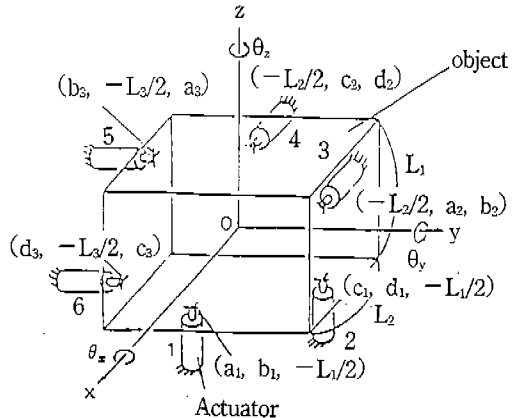
2. 기구의 특징

각자유도의 동적특성은 다음과 같은 특징을

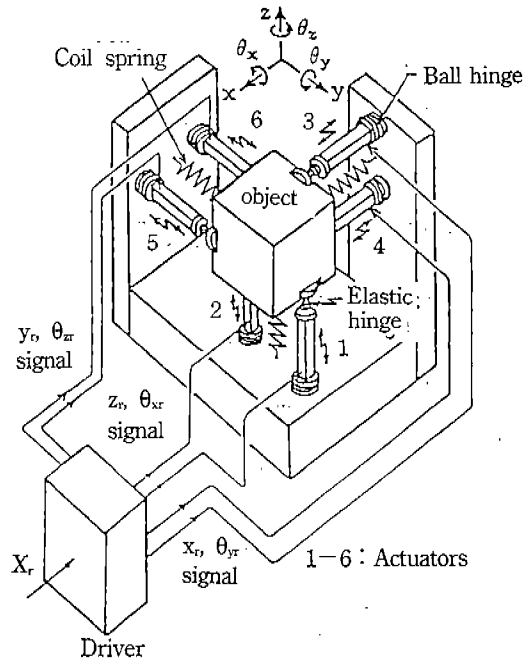
갖는 고속 고정도의 6축미동기구를 이용한다.⁷⁻⁹⁾

- (1) 착안한 대상의 6운동방향에 모두 동일제어특성을 갖는다.
- (2) 각 방향의 구동에 사용되는 Actuator수가 같고 또한 적게한다.
- (3) 각 방향사이에 원리적으로 간섭이 없다.

이와 같은 특징을 갖는 기구의 제작에 있어서 Actuator의 배치와 설계에 대한 개념도를 Fig.1에 나타낸다.



(a) System configuration



(b) Schematic mechanism

Fig.1 Design on the actuator placement

2.1 Actuator의 배치⁹⁻¹¹⁾

Fig.1의 System에서 각변의 길이가 L_1, L_2, L_3 인 직방체를 대상으로 하고 Actuator는 다음의 조건을 만족하도록 배치한다.

- (1) 착안한 운동방향은 직교3축(X, Y, Z축) 방향의 병진운동과 3축주위를 회전한다. 운동 착안점은 직교 3축을 원점으로 한다.
- (2) 6개의 동일한 성능을 가진 PZT-Actuator로 대상을 구동한다. Actuator의 신축방향은 직교3축의 축방향과 일치시킨다.
- (3) 동특성의 동일화를 용이하게 하기위해 각 축방향에 2개의 Actuator를 배치한다. 2개의 액츄에이터의 대상과 작용점은 Fig.1처럼 각좌표평면에 평행한 평면상에 있도록 한다.

구동대상의 위치 자세를 $X=(\dots \theta_n, \theta_n, \theta_x)^T$, 대상의 목표가 되는 위치 자세를 $X_r=(x_n, y_n, z_n, \theta_n, \theta_x, \theta_x)^T$ 로 하며 X_r 과 X 사이에서 동적인 동작을 고려한 변환행렬 M 에 의해

$$X=M X_r \tag{1}$$

로 된다. M 값의 각 대각선항이 같다고 말하지만 이는 각 방향의 정적·동적특성이 같기 위한 조건이며 특별히 M 이 대각행렬로 되는것이 각 방향사이에 간섭을 발생하지 않기 위한 조건이다. 이 두조건은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$M=f(s) E \tag{2}$$

E : 단위행렬

여기서, 식(2)를 만족하는 Actuator의 배치는 다음의 식(3)~식(6)과 의미가 통하게 된다.

$$b_1=d_1=b_2=d_2=b_3=d_3 \tag{3}$$

$$a_1=-c_1=\sqrt{(U_n/M)} \tag{4}$$

$$a_2=-c_2=\sqrt{(U_n/M)} \tag{5}$$

$$a_3=-c_3=\sqrt{(U_n/M)} \tag{6}$$

단,

M : 대상물의 질량
 I_x, I_y, I_z : 대상물의 X, Y, Z축의 관성 모멘트

$b_1 \sim b_3, d_1 \sim d_3$: 각 Actuator의 좌표

2.2 PZT Actuator의 동작원리

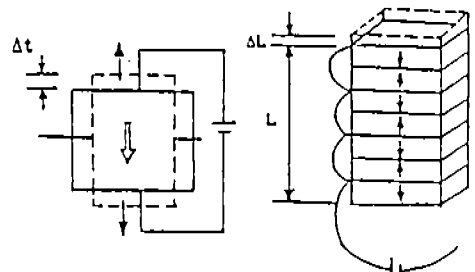
힘 및 가속도에 의해 변형을 주면 전압이 발생하고(압전효과) 반대로 전압을 인가하면 변형이 발생(역압전효과)하는 성질을 압전성이라 한다. 이성질을 이용한 세라믹스를 압전세라믹스라 한다. 세라믹스에 전압을 가하면 Fig.2(a)처럼 분극방향과 같은 방향에는 인장변형(종효과), 직각방향에는 압축효과(횡효과)가 발생한다.

압전종효과에 의한 변형을 이용한것이 PZT Actuator이다. 압전 종효과의 변형은 다음 식(7)과 같다.

$$\Delta t=d33 V \tag{7}$$

여기서, Δt : 변위량
 V : 인가 전압
 $d33$: 압전 상수

따라서 소자를 Fig.2(b)처럼 전기적으로 병렬로 n 층 쌓아 올리면 전체의 변위량은 각 소자의 변위량 Δt 의 합으로 된다. 즉,



(a) Vertical effect and horizontal effect (b) Laminated type piezo actuator

Fig.2 Actuator principle

$$\begin{aligned}
 \Delta L &= n \Delta t \\
 &= n d33 V \\
 &= L/t \cdot d33 V \\
 &= E d33 L
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

여기서, $E=V/t$ 전계강도 이다.

3. 제어계의 구성

Fig.3에 기구의 동적 모델을 나타낸다. 센서는 정전용량형 변위계(ADE사의 마이크로센서)를 Actuator의 정면에 배치하여 대상의 미동량을 비접촉으로 검출한다.

이 변위량을 $S=(s_1, s_2, \dots, s_n)^T$, 첨자는 Actuator의 번호라고 하며 대상의 위치 자세 $X=(x, y, z, \theta_x, \theta_y, \theta_z)^T$ 는 식 (9)로부터 구해진다.

$$X = A S \tag{9}$$

여기서,

$$A = \begin{bmatrix}
 0 & 0 & 1/2 & 1/2 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 1/2 & 1/2 \\
 1/2 & 1/2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 1/2r & -1/2r & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 1/2r & -1/2r & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 1/2r & -1/2r
 \end{bmatrix}$$

이고 r 은 동일평면위에 배치된 2개의 Actuator사이의 거리에 1/2이다.

Fig.4에서는 제어계의 블록선도를 나타낸다. 기구의 전달함수를 $G(s)$ 라하면 병진운동의 $G(s)$ 는 다음과 같다.

$$G(s) = G_p(s) \cdot \frac{2Cs + 2K}{Ms^2 + 2(C+C_1)s + 2(K+K_1)} \tag{10}$$

$G_p(s)$ 는 Actuator의 동특성이며 다음과 같이 근사시킬 수 있다.

$$G_p(s) = \frac{k_p(\eta_0 s + 1)}{1 + T_p s} \cdot \frac{\omega_0^2}{s^2 + 2\zeta_0 \omega_0 s + \omega_0^2} \tag{11}$$

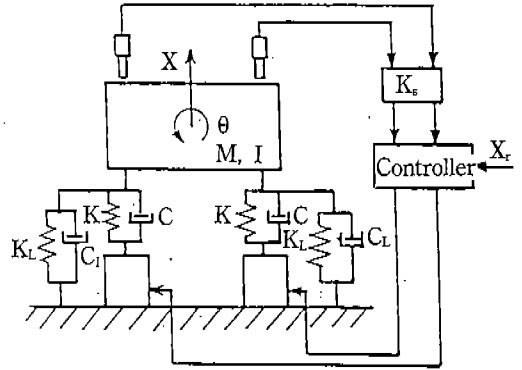


Fig.3 Dynamic model

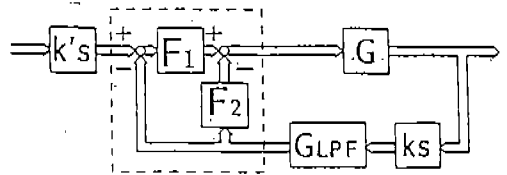


Fig.4 Block diagram

식 (10)은 병진운동의 전달함수이며 M 을 I 로 치환하고 C, C_1, K 및 K_1 에 r^2 을 곱하면 회전운동의 전달함수가 된다.

제어기는 Fig.4의 $F_1(s)$ 와 $F_2(s)$ 에 각 PI요소로 식 (12) 및 D요소인 식 (13)을 이용하여 PI-D 제어기를 적용한다. 여기에서 완전미분요소는 실현되지 않으므로 D요소는 식 (13)에 나타난 것처럼 불완전 미분으로 된다. T 는 불완전미분 시정수이다.

$$F_1 = \beta + \frac{\gamma}{s} \tag{12}$$

$$F_2 = \frac{\alpha s}{1 + T_a s} \tag{13}$$

제어기는 컴퓨터 시뮬레이션에 의해 설계하며 설계시 Parameter의 설정은 먼저 Actuator의 단체특성을 측정하고 식 (11)에 따르는 파라미터 $k_p, T_p, \omega_0, \zeta_0$ 및 η_0 는 Identification actuator의 동특성 $G_p(s)$ 를 결정한다. $G_p(s)$ 의 주파수 특성을 Fig.5에 나타낸다.

다음은 Actuator를 짜넣고 기구의 개회로 특

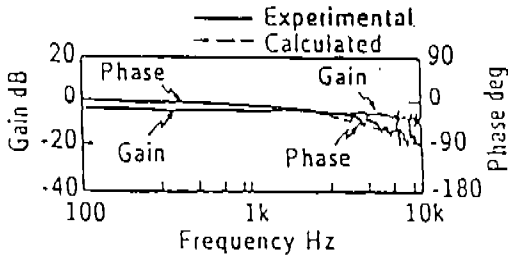


Fig.5 Frequency characteristics of actuator

성을 측정하여 식 (10)에 따르는 M 의 실제 측정값과 r 의 설계값에 대하여 I, C, C_n, K 및 K_i 값을 동시에 결정한다.

Fig.5의 시뮬레이션이 실험과 잘 일치하고 동적 모델이 타당함을 알 수 있다. 그리고 6자유도 모두 동일한 결과를 얻었으며 설계법의 유효성도 확인되었다. 기구의 진동수는 6자유도 모두 1.30 kHz이었다.

4. 궤적실험 및 고찰

병진 2방향 또는 회전 2방향에 동시에 Step 입력을 가하는 경우에 있어서 대상의 동적 궤적을 고찰하고 6자유도미동기구의 특성을 재 검토하고 유효성을 확인하였다.

4.1 직선운동

병진방향으로 2방향에 동시에 같은 높이의 Step을 입력하고 45° 방향으로 직선운동을 시켰다. X-Y, X-Z의 각 평면에서 실시한 실험결과를 Fig.6과 Fig.7에 나타낸다.

각각의 Step 높이는 0.1 μ m와 1.0 μ m인 2종류의 실험을 하고 전자는 30회 후자는 10회의 평균 데이터를 사용한다.

Fig.6의 X-Z 평면에서는 x방향과 z방향의 특성이 동일하게 됨을 나타낸다. 1.0 μ m 입력의 경우는 0.1 μ m 입력의 경우에 비해 Over Shoot량이 약간 크게 됨을 알 수 있다. 그 이유는 불분명하지만 Ball Hinge부의 Spring Coff가 접촉압에 의한 변화를 보이는 비선형성 때문일것으로 생각된다.

또한 Fig.7을 보면 X-Y 평면의 경우 y방향에 사용되는 고전압공급회로가 다르기 때문에 직선이 되지 않을것으로 생각되어진다. 그래서 그 이유가 고전압공급회로 때문인가를 규명하기 위해서 확인실험을 실시하였다. y, θ_z 방향과 z, θ_x 방향의 고전압 공급회로를 변경하여 실험한 결과가 Fig.8과 같이 나타났다. X-Z 평면과 고전압공급회로를 변경하여 실험한 결과 X-Y 평면에서도 동일한 직선이 그려졌다.

이처럼 모든 실험에서 거의 완전한 직선이 그

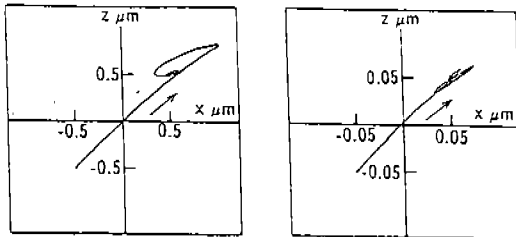


Fig.6 Linear motion
(The direction of plane X-Z 45°)

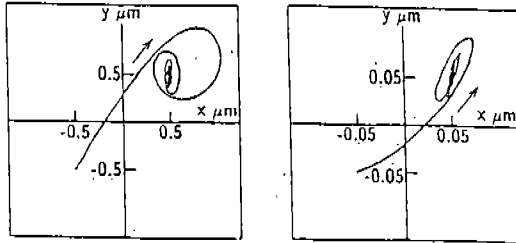


Fig.7 Linear motion
(The direction of plane X-Y 45°)

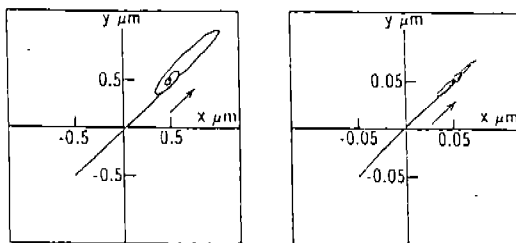


Fig.8 Linear motion
(The direction of plane X-Y 45°)
(The case of changing high-voltage supply circuit of y, θ_z and z, θ_x direction)

려짐을 알 수 있다. 이것은 실험에 사용된 기구가 병진방향에 있어서 동특성이 동일함을 알 수 있으며 평면상에서 임의의 방향에 직선운동이 가능한것임을 의미한다.

4.2 임의의 축 주위의 회전운동

회전운동에 있어서 임의의축에 회전2방향 동시에 Step 입력을 가하는 실험을 실시한다. Fig.9에 회전 두방향 동시입력시의 회전운동에 대해 설명한다. θ_x 와 θ_y 에 동시에 Step을 입력한 경우 대상은 동적으로 x 축방향의 가속도 벡터와 y 축방향의 가속도 벡터의 합성가속도 벡터로 표시되는 회전운동을 한다. 또한 정적으로 즉, 최종적인 회전량은 합성가속도 벡터의 크기를 시간에 대해 적분한 값으로 표시되며 합성가속도 벡터의 크기는 Step 입력인 시간에 의해 변화된다.

본 연구에 사용된 기구는 각방향의 특성이 동

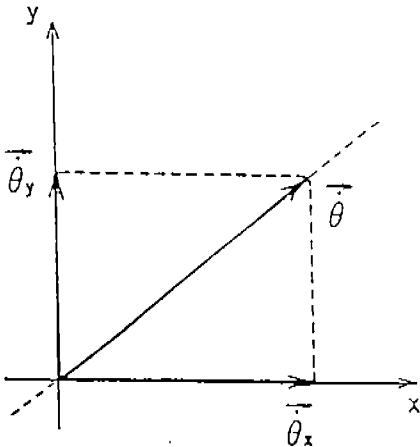


Fig.9 Explanation drawing of synchronous input in two-direction rotary

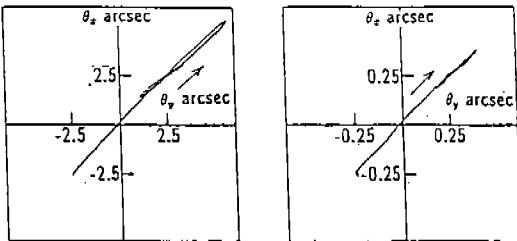


Fig.10 Rotary motion (The direction of plane X-Y 45°)

일한것으로 합성가속도 Vector의 방향은 고정되며 대상은 그방향의 고정축 주위로 회전하고 또한 최종적인 회전량인 θ_x , θ_y 의 입력값은

$$\sqrt{(\theta_x^2 + \theta_y^2)}$$

으로 된다.

2방향 동시에 같은 높이의 Step 입력을 가한 경우의 실험 결과를 Fig.10에 나타낸다.

입력방향은 θ_x 와 θ_y 로 하며 각각의 Step 높이를 0.5arcsec와 5.0arcsec로 전자는 30회, 후자는 20회의 평균데이터를 이용하여 2종류의 실험을 실시하였다. 이것은 X-Y 평면상에서 x 축(횡축)을 취할 경우에 x 축으로부터 반시계방향으로 45° 직선을 고정축으로 해서 0.707arcsec 및 7.07arcsec 회전하는 것에 해당하며, Fig.10에서 보면 알 수 있듯이 회전구동시의 궤적도 역시 직선이되고 θ_x 방향과 θ_y 방향의 특성이 동일함을 보이고 있다.

그리고, 회전의 경우도 병진의 경우와 같으므로 5.0arcsec 입력의 경우에는 0.5arcsec 입력의 경우에 비해서 Over Shoot량이 약간 크게됨을 알 수 있었으며, 이 이유도 명확하지는 않지만 병진의 경우와 같을 것으로 생각 된다.

본 실험의 결과 병진운동(직선)이나 회전운동의 경우 거의 완전한 직선이 그려짐을 알았으며, 이는 본기구가 회전방향에 있어서도 동특성이 같음을 의미한다. 즉 원점을 통과하는 임의의 방향의 고정축주위의 회전운동이 가능한것임을 의미한다.

5. 결 론

본 연구의 실험 결과 각축에 대한 직선운동이나 임의의 축에 대한 회전운동 동작사이에 거의 완전한 직선 궤적을 보였다. 이로부터 PZT Actuator에 의한 각 방향사이에 동일한 제어특성을 갖는다는 것을 알 수 있었다. 따라서 6자유도미동기구의 동특성 검토결과 그 유효성이 재확인 되었으며, 또한 Actuator에 인가전압을 가하는 제어기의 고전압 공급회로가 다른회로에 비해 약간의 차이를 보이고 있으나 고전압공급회로를

변경하여 회로상의 오차임을 밝혔다.

본 연구결과를 이용하여 또다른 특성시험을 통해 본 기구의 유효성을 재삼 확인하고 연구로만 끝내지 않고 실제로 산업에 응용하고자 한다. 특히 반도체 제조장치의 일부인 Table의 미세 위치 자세결정 제어에 적극 응용할 수 있도록 하고자 한다.

참 고 문 헌

1. Mori Yama, "Precision machine 50", 4(1984) 718.
2. Kouno.E., Ann, "CIRP", 33, 1(1984) 369.
3. Patterson, S.R. and Magrab, E.B. "PRECIS. ENG.", 7, 3(1985) 123.
4. Shimizu.H.Proc, "China-Jpn Symp", Mechatron., (1988) 58.
5. S.Yamazaki, S.Nakayama, S.Ishihara and S.Sasayama, "High Accuracy X-ray Lithography System", Bull JSPE, 14, 3(1980) 137.
6. T.M Lyszczarz, D.C.Flanders, N.P.Economou and P.D. De Graff, "Experimental Techniques for Multiple Mask Registration", J. Vac. Sci. Technol., 19, 4(1986) 1214.
7. H.Shimizu, Y.takeuchi, H.Inada and T.Sata, "A Basic Study on the Development of a Highly Accurate Rotation Positioning Actuator", JSPE, 88, 9(1989) 1641.
8. N.Henmi, S.Wada, H.Aoyama, H.Osada and A. Shimokohbe, "A Six-Degrees-of-Freedom Fine Motion Mechanism", JSPE, 55, 4(1989) 761.
9. F.E Scire and E.C Teague, "Piezodriven 50 μ m range Stage with Subnanometer Resolution", Rev. Sci. Instrum., 49, 12(1978) 1735.
10. H.Aoyama, I.Watanabe and A.Shimokohbe, "Control Mechanism for a High Precision Straight Motion System", IFTOMMK, 7th World Congress, (1987) 1477.
11. H. Ozisik and R.F.Keltie, "Development and Implementation of a High Speed Loop Control Technique for Micro-positioning of Mechanical Structures", JSPE, 58, 4(1989) 225.
12. 김재열, 오환교, "6자유도 미동기구의 제어 특성에 관한 연구" 조선대학교생산기술연구소, Vol 14. No 2. pp 125-132, 1992
13. 김재열, 오환교, 한재호, "적용제어기법을 이용한 다자유도 진동모델의 위치 및 자세결정에 관한연구", 한국자동차공학회 춘계학술대회논문집, pp97-105, 1993