

초정밀 조미동 위치결정기구의 설계 및 제어에 관한 연구

김재열*, 조영태**, 오보석***, 오성민****, 박기형*****

A Study on the Design and Control Super-Precision Coarse and Fine Positioning Apparatus

Jae-Yeol Kim*, Young-Tae Cho**, Bo-Suk O***, Sung-Min O****, Ki-Hyung Park*****

ABSTRACT

The study was carried out development a precision positioning apparatus, consisting of DC servo motor and piezoelectric actuator. This system is composed of fine and coarse apparatus, measurement system and control system. Piezoelectric actuator is designed for fine positioning. Coarse positioning using lead screw is driven by DC servo motor. Control system output a signal from laser interferometer and capacitive sensor to amplifier of DC servo motor and piezoelectric actuator after digital signal processing(DSP). Resolution of this apparatus measure with laser interferometer and microsense

Key Words : Piezoelectric actuator(압전소자 액츄에이터), Fine positioning(미동위치결정), Coarse positioning(조동위치결정), Resolution(분해능), DSP(digital signal processing)

Nomenclatures

K_1 : 모터의 유기전압 정수
 K_2 : 모터의 토크 정수
 x_c : 조동테이블의 위치
 M : 테이블의 질량 (조동테이블 + 너트 + 미동기구질량)
 θ : 축회전각
 T : 모터에서 공급되는 토크
 N : 나사축과 너트사이의 항력
 v_m : 모터 앰프로의 입력전압

J : 축관성
 G_m : 모터 앰프의 게인
 C_s : 축접성계수
 ϕ : 나사축의 리드각
 L_m : 모터의 인덕턴스
 R_m : 모터전기자 저항
 ℓ : 나사의 리드
 K : 나사축의 회전각을 테이블 변위로의 변환정수
 m : 미동테이블 질량
 x : 미동테이블 변위

* 조선대학교 수송기계부품 공장자동화 연구센터

** 静岡大學 工學部

*** 조선대학교 기계설계공학과 대학원

**** 조선대학교 정밀기계공학과 대학원

***** 조선대학교 병설공업전문대 기계과

- x_p : 압전소자 변위
- k_p : 압전소자 스프링 계수 (2.23×10^7 N/m)
- c_p : 압전소자 점성계수
- C : 압전소자의 정전용량
- R : 부하저항
- G_p : 압전소자의 구동용 앰프게인
- v_p : 앰프입력전압
- v : 압전소자 인가전압

- K_p : 압전소자 입력전압에서 미동기구 변위까지의 게인
- \dot{x} : 미동테이블의 속도
- \dot{x}_c : 조동테이블의 속도
- i_m : 모터의 구동전류
- \ddot{x}_c : 조동테이블의 가속도
- $\dot{\theta}$: 축회전각속도
- $\ddot{\theta}$: 축회전각가속도
- y : 출력방정식

1. 서 론

초정밀위치결정기구는 정밀가공기, 정보기기, 계측기기, 반도체 제조장치등의 각종 산업기기에 있어 중요장치로 많이 이용되고 있다. 현재는 각 분야에서 고정도가 요구되고 있어 이에 대응할 수 있는 고정밀 미동체어 위치결정 기구에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 0.01 μ m이하의 변위를 쉽게 제어할 수 있는 압전소자로 만들어진 액츄에이터를 이용한 초정밀 위치결정장치가 개발되고 실제 산업에 이용하기 위한 노력이 계속되고 있다. 또한 고정도와 함께 대 스트로크(Stroke)를 가지며, 동시에 고속동작의 실현이 필요하다. 따라서 이런 여러 성능을 만족시키는 초정밀위치결정기구는 고정도를 요하는 각 분야에 다양한 응용이 가능하리라 본다. (1)~(6)

고속, 고정도, 대 스트로크의 위치결정을 실시할 경우 1자유도에 대해 2종류의 기구를 이용하는 방법이 있다. 즉 고속, 대 스트로크의 조동위치 결정과 변위분해능을 높이는 정밀위치 결정을 병행하여 실시한다. 이와같은 위치결정기구는 현재 많이 제안되어 있다. 그러나 이들 기구의 제어방법은 기구의 구성조건에 따라 서로 다르며, 가동범위가 서로 다른 2종류의 액츄에이터(Actuator)로 원하는 정도를 얻기 위해서는 기구에 알맞는 제어방법이 필요하다.

종래의 제어방식을 보면 조동위치결정과 미동위치결정을 순차적으로 반복하여 제어하는 분리방식과 조동과 미동기구를 동시에 제어하는 연동제어방식으로 크게 나눌 수 있다. 전자의 경우는 분리방식은 조동기구로 미동기구에서 위치편차보상이 가능한 위치결정을 실시한 후, 나머지 편차를 보상하는 방식으로 조동과 미동위치 결정이 시간적으로 완전히 분리되어 있다. 연속제어방식은 조동동작이 실시되는 도중에 미동기구의 위치결정동작을 실시하는 방법이다. (7)~(10)

일반적으로 많이 이용되는 조동기구로는 이송나사식, 마찰구동식, 벨트식 등이 있다. 이들은 큰 가동범위를 갖고, 고속으로 위치결정이 가능하며 큰 부하에 대응할 수 있는

장점을 가지는 반면에 고정도 위치결정이 곤란한 단점이 있다. 미동기구는 고정도의 위치결정이 가능하지만 스트로크가 짧고 작은 부하에 적합하다. 따라서 압전소자(PEA)를 이용한 기구가 많이 사용된다. (11)~(13)

본 연구에서는 조동기구로는 이송나사를 미동기구로는 탄성힌지를 이용하여 구성하고 각각의 구동기(Actuator)로는 DC서보모터와 압전소자를 이용한다. 또한 계측시스템은 레이저 측장시스템(Laser Measurement System)과 정전용량형 변위계(Capacitive Sensor)에 의해 변위를 측정하고, 제어기(Controller)로는 디지털신호처리시스템(DSP)을 이용하여 조동 및 미동기구의 위치제어를 실시하고 또한 이를 통하여 조미동 위치결정기구에 대한 유효성을 확인하고 제어성능을 평가하고자 한다.

2. 조미동 위치결정기구의 구성과 모델링

2.1 조미동기구

Fig.1에 조미동기구를 나타낸다.

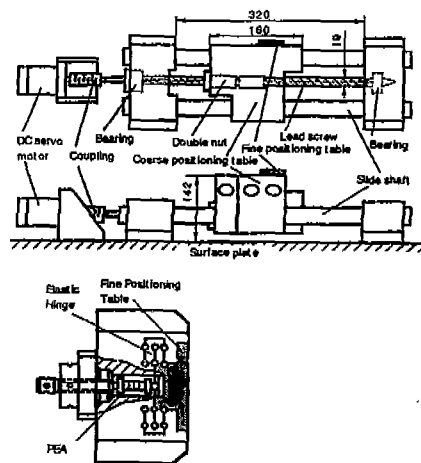


Fig.1 Coarse and Fine Positioning Apparatus

본 기구는 조동위치결정기구와 조동기구위에 고정시킨 미동위치 결정기구로 구성된다.

조동기구에는 여러방식이 있지만 여기서는 이송나사(Lead Screw) 기구를 채택하였다. 이송나사 기구는 나사(Screw)와 더블 너트(Double Nut)로 구성되어 있고, DC서보모터(UGTMEM-03SB)에 의해 구동시킨다. 모터의 회전운동은 더블너트식 볼나사(리드 2mm, 외경 19mm)에 의해 직선운동으로 변환되어 조동테이블을 움직인다. 이동거리는 약 160mm이고 DC서보모터는 구동용 서보앰프에 의해서 최대 약 2A의 전류공급이 가능하고 조동테이블을 약 600mm/s로 이동이 가능하다.

미동기구는 탄성원칙의 미동테이블을 구성하고, 압전소자(東北金屬製 NLA-10×10×18)에 의해 구동시킨다. 구동범위는 ±5μm이다.

2.2 기구의 모델

Fig.2에 조미동기구의 모델을 나타낸다.

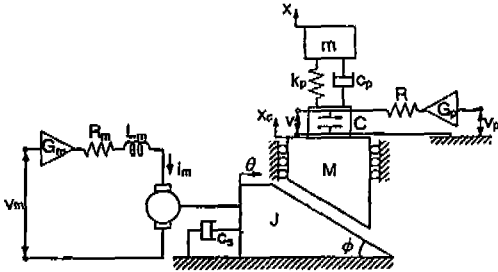


Fig. 2 Model of Coarse-Fine Positioning Apparatus(Dual Positioning)

(1) 조미동기구의 모델

조동기구는 제어대상을 고속으로 목표치 부근에 위치결정을 실시하는 것을 목적으로 한다. 여기서는 커플링과 볼나사 및 너트사이의 스프링효과는 무시하고, 모터축 커플링과 이송나사축을 하나의 강체로 보고 모델을 간략화했으며 마찰토크도 무시하였다. 먼저 이송나사축의 운동방정식을 세우면

$$J \ddot{\theta} + C_s \dot{\theta} = -\frac{d}{2} N \sin \phi + T \tag{1}$$

조동테이블의 운동방정식은

$$M \ddot{x}_c = N \cos \phi \tag{2}$$

더블너트의 회전과 테이블의 변위는

$$x_c = \frac{\ell}{2\pi} \theta \equiv K\theta \tag{3}$$

모터에 흐르는 전류와 발생 토크는

$$T = K_2 i_m, \quad \text{또는} \quad \tan \phi = \frac{\ell}{\pi d} \tag{4}$$

의 관계가 성립한다.

모터의 회로방정식은

$$v_m = R_m i_m + L_m \dot{i}_m + K_1 \theta \tag{5}$$

식(1)(2)(3)(4)에 의해

$$(J + K^2 M) \ddot{x}_c + c_s \dot{x}_c = KK_2 i_m \tag{6}$$

이 얻어진다. 또한 식 (3)(5)에 의해서

$$v_m = R_m i_m + L_m \dot{i}_m + K_1 \frac{\dot{x}_c}{K} \tag{7}$$

식(6)(7)에 의해서 x_c, \dot{x}_c, i_m 을 상태변수로 하고, 입력력은 모터앰프의 입력전압으로 하는 상태방정식을 유도하면 식(8)이 되고

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_c \\ \dot{x}_c \\ \dot{i}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & \frac{-c_s}{J + K^2 M} & \frac{KK_2}{J + K^2 M} \\ 0 & \frac{-K_1}{L_m K} & \frac{-R_m}{L_m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ \dot{x}_c \\ i_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{G_m}{L_m} \end{bmatrix} v_m \tag{8}$$

출력방정식은 아래 식(9)와 같이 된다.

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ \dot{x}_c \\ i_m \end{bmatrix} \tag{9}$$

(2) 미동기구의 모델

미동기구에 대한 운동방정식들은 다음과 같다.

미동테이블의 변위와 압전소자와의 변위관계는

$$m\ddot{x} + c_p(\dot{x} - \dot{x}_p) + k_p(x - x_p) = 0 \tag{10}$$

로 되고 압전소자 양단의 전압과 압전소자의 변위관계는

$$\dot{x}_p = K_p v \tag{11}$$

이다. 그리고, 앰프의 입력전압과 압전소자 양단의 전압관계를 보면

$$G_p V_p = RC \dot{v} + v \tag{12}$$

로 됨을 알 수 있다.

식(10)(11)(12)로부터 x, \dot{x}, v 상태변수로 하는 상태방정식은

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{\dot{x}} \\ \dot{v} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -\frac{k_p}{m} & -\frac{c_p}{m} & \frac{k_p K_p}{m} \\ 0 & 0 & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ v \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{c_p G_p K_p}{RC_m} \\ \frac{G_p}{RC} \end{bmatrix} v_p \tag{13}$$

이 되고 출력방정식은 식(14)와 같이 된다.

$$y = [1 \ 0 \ 0] \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ v \end{bmatrix} \tag{14}$$

2.3 실험장치도

Fig.3에 실험장치도를 나타냈다.

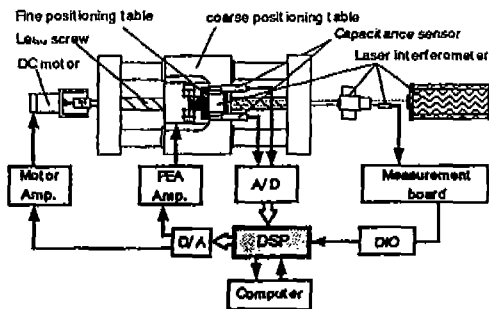


Fig.3 Schematic Diagram of Precision Dual Positioning System

장치는 조동, 미동기구와 계측시스템 그리고 제어시스템부로 구성하였다. 정밀위치 결정테이블의 변위측정을 위하여 변위분해능이 0.62 μ m이고 측정범위가 ± 1.33 m의 레이저 측정시스템(ZYGOMI-1000)을 사용하고 조동기구에 대한 미동기구의 상대변위 측정을 위해서 정전용량형변위계(ADE社 : microsense)를 이용하였다. 이것은 변위분해능이 10nm이하이고 측정범위가 $\pm 25\mu$ m이다.

제어시스템으로는 디지털 신호처리시스템(DSP)을 사용한다. 이는 레이저 측정시스템과 정전용량센서로부터의 신호를 각각 A/D변환하고 DSP의 메인 CPU에서 연산처리를 실시한 다음 D/A변환을 하여 DC서보모터용 앰프와 압전소자 구동용 앰프로 출력한다.

3. 제어계 설계

조미동기구는 조동과 미동을 동시에 제어되도록 하고 미동기구의 스트로크가 $\pm 5\mu$ m로 매우 작으므로 연동동작 중에 미동기구의 변위가 스트로크 범위를 넘지 않도록 주의하여 설계하고 본 기구는 2개의 구동앰프에 제어동작을 입력하여 목표치인 1개의 출력시스템으로 생각하고 현대제어 이론을 적용하여 실험하였다. 이 제어계의 상태방정식과 출력식을 보면 다음과 같다.

$$\dot{x}_s = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{24} & a_{25} & a_{26} & a_{27} \\ 0 & 0 & a_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{55} & a_{56} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{65} & a_{66} \end{bmatrix} x_s + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ b_{21} & 0 \\ b_{31} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & b_{62} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_p \\ v_m \end{bmatrix} \tag{15}$$

$$x_s = [x \ \dot{x} \ v \ x_c \ x_m \ i_m]^T \tag{16}$$

$$\dot{y} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} x_s \tag{17}$$

$$y = [1 \ 0] \dot{y} \quad (18)$$

$$a_{21} = -\frac{k_p}{m}, \quad a_{22} = -\frac{c_p}{m}$$

$$a_{23} = \frac{k_p K_p}{m} - \frac{c_p K_p}{RCm}$$

$$a_{24} = \frac{K_p}{m}, \quad a_{25} = \frac{c_p}{m}, \quad a_{33} = -\frac{1}{RC}$$

$$a_{55} = \frac{-c_s}{J + k^2 M}, \quad a_{56} = \frac{KK^2}{J + K^2 M}$$

$$a_{65} = -\frac{K_1}{L_m K}, \quad a_{66} = \frac{-R_m}{L_m}$$

$$b_{21} = \frac{c_p G_p K_p}{RCm}, \quad b_{31} = \frac{G_p}{RC}$$

$$b_{62} = \frac{G_m}{L_m}$$

이다.

4. 조미동 위치결정 실험 및 고찰

Fig.3의 조미동 위치 결정기구를 구성하여 고정밀 위치 결정을 실시하였다. 미동테이블을 미소 변위로 위치결정을 시킬 때 미동테이블 위치를 위치 피드백(Feedback) 센서인 레이저 간섭 변위측정기를 이용해 변위를 측정한다. 동시에 조동테이블에 대한 미동테이블의 상대변위를 측정하기 위해 2개의 정전용량센서를 이용하여 측정하였다.

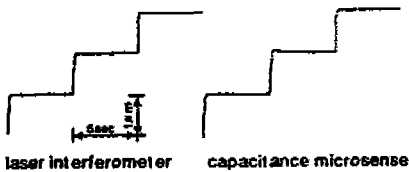


Fig. 4 Step Response Measured by Laser interferometer and Capacitance Microsense

Fig.4에 미동기구를 구동시켜 2종류의 센서로 동시에 측정된 결과이다. 두 측정치가 일치하고 있음을 알 수 있다. 조동 미동의 제어는 디지털 신호처리 시스템(DSP)에 의해 실시하고 동작명령은 AT&T사의 DSP용 C언어와 MS-C를 병용하여 제어프로그램을 구성하고 DSP에 의해 위치 결정제어를 실시하였다.

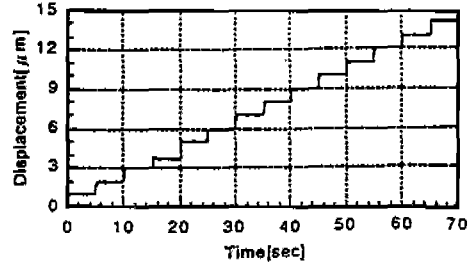


Fig. 5 Long Stroke Positioning of 1 μ m Step for Dual Positioning

Fig.5는 DC서보모터와 압전소자에 의해 구동되는 조미동기구를 1 μ m스텝으로 큰 스트로크의 위치결정을 실시하여 레이저 측정기에 의해 측정된 결과의 일부본이다.

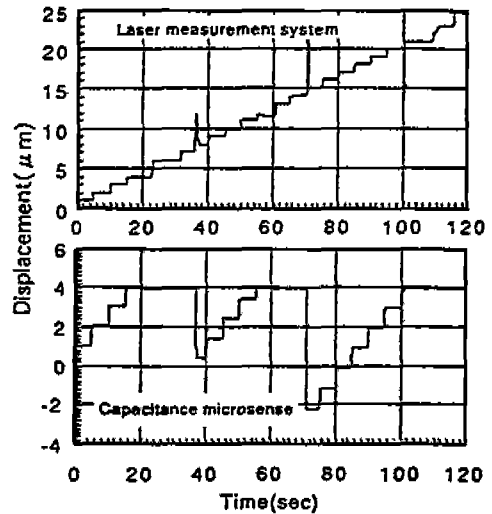


Fig.6 Control of the 1 μ m Step Positioning

Fig.6은 1 μ m스텝으로 위치결정을 실시하여 레이저측정기와 정전용량센서에 의해 측정된 결과이다. 각각의 스텝을 5초의 장시간 동안 유지하도록 하였다. 변위는 제약이 있지만 압전소자 단독으로는 미동테이블을 큰 스트로크로 위치결정이 곤란하지만 리드 스크류에 의해 구동되는 조동기구를 결합한 연동제어를 함으로서 대스트로크위 위치결정이 가능하였다.

Fig.7은 조미동연동제어를 실시할 때의 미동기구의 변위 특성을 압전소자(PEA)에 인가되는 전압이 11V일때 전압과 변위의 관계이다. 변위는 약 0.1 μ m/V이다.

조미동기구의 연동제어 실시중의 본 기구의 응답특성은 Fig.8과 같으며 이는 연동제어시의 최소위치분해능이

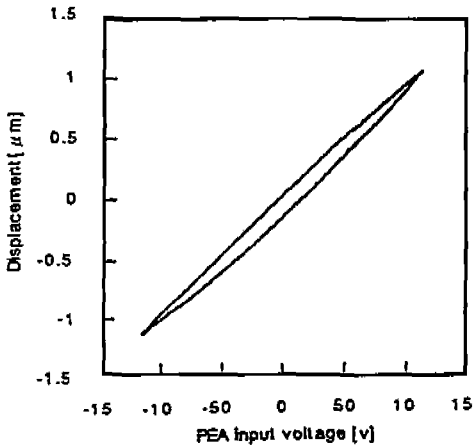


Fig.7 Characteristic of Fine Apparatus (11V)

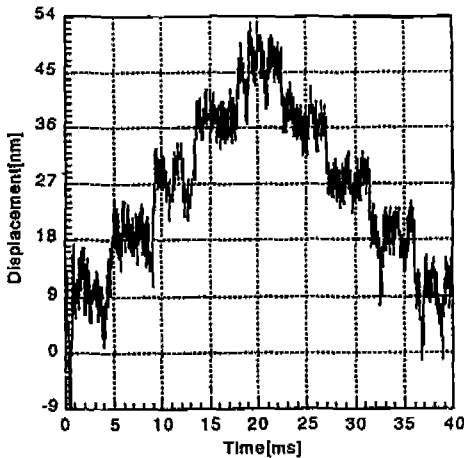


Fig. 8 Resolution for Dual Positioning

9nm임을 알 수 있다. 본 기구의 제어에서는 조동 미동의 연동에 있어서 미동명령을 DC서보모터와 PEA에 동시에 내려 미동테이블의 위치 결정이 가능하였다.

5. 결 론

DC서보모터와 압전소자에 의해 구동되는 조동 미동기구를 구성하고 2입력에 있어서 1출력의 미동위치 결정시험을 실시하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 본 기구에 있어 조동 미동기구의 연동제어에 의한 1출력의 미동위치 결정을 할 수가 있었다.

(2) 조미동기구에 있어서 9nm의 위치결정 분해능을 얻을 수 있었으며 대 스트로크의 위치결정이 가능하였다.

6. 참고 문헌

1. Mori Yama, "Precision Machine 50", 4, p.718, 1984.
2. Kouno, E., Ann, "CIRP", 33, 1, p.369, 1984.
3. Patterson, S. R. and Margrab, E. B., "PRECIS. ENG", 7, 3, p.123, 1985.
4. Shimizu, H., "Proc, China-Jpn Symp. Mechatron", p.58, 1988.
5. S. Yzmazaki, S. Nakayama, S. Ishihara and S. Sasayama, "High Accuracy X-ray Lithography System", Bull JSPE, 14, 3, p.137, 1980.
6. T. M. Lyszczarz, D. C. Flanders, N. P. Economou and P. D. DeGraff, "Experiment Techniquess for Multiple Mask Registration", J. Vac. Sci. Technol., 19, 4, p.1214, 1986.
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, p.1641, 1989.
8. N. Henmi, S. Wada, H. aoyama, H. Osada and A. Shimokohbe, "A Six-Degree-of -Freedom Fine Motion Mechanism", JSPE, 55, 4, p.761, 1989.
9. F. E. Scire and E. C. Teague, "Piezodriven 50 μm range Stage with Subnanometer Resolution", Rev. Sci. Istrum., 49,12, p.1735, 1978.
10. H. Aoyama, I. Watanabe and A. Shimokohbe, "Control Mechanism for a High Precision Straight Motion System", IFTOMM, 7th World Congress, p.1477, 1987.
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, p.225, 1989.
12. 김재열, "PZT Actuator를 이용한 6자유도 미동기구의 궤적 특성에 관한 연구" 대한기계학회 학술강연회, p.21-28, 1992.
13. 김재열, 오환교, "6자유도 미동기구의 제어 특성에 관한 연구", 조선대학교 생산기술연구소, Vol.14, No.2, p.125-132, 1992.