

# 6 자유도 정밀 위치결정 스테이지의 견실 제어기 설계 Design of robust controller for a 6-dof precision positioning stage

\*#문준희<sup>1</sup>, 박희재<sup>2</sup>

\*#J. H. Moon<sup>1</sup> (junheemoon@gmail.com), H. J. Pahk<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 대림대학 메카트로닉스과, <sup>2</sup> 서울대학교 기계항공공학부

Key words : Precision positioning stage, Robust control, 6-DOF

## 1. 서론

반도체 및 디스플레이 산업이 크게 발전함에 따라 공정 에 필요한 리포그래피 등에서 사용되는 위치 결정 장치나 TFT-LCD의 컬럼 스페이서 등의 측정에 사용되는 측정 장비에서 초정밀 위치 및 자세 제어기의 요구되는 정밀도 또한 크게 증가하고 있다 [1-9].

본 연구에서는 6 자유도 정밀 스테이지의 불확실성을 고려하여 정밀한 위치제어 시스템을 개발하는데 목표를 두었다.

정밀 위치 및 자세 결정을 위한 6 자유도 스테이지의 일반적인 특징은 다음과 같다.

첫째로는, 초정밀 구동기로서 압전 구동기와 같이 비선형성이 강한 구동기를 쓰는 경우가 많다. 비선형성으로 인해 발생하는 일반적인 현상은 시스템의 이득이 진폭이나 주파수, 이력 등에 따라 달라지는 것이다. 이와 같은 비선형성은, 선형제어기로 설계할 경우, 결과를 예측하기 어렵게 한다.

둘째로는, 센서의 잡음이 시스템의 성능에 영향을 준다는 것이다. 큰 이송거리를 갖는 시스템에서는 별 문제가 없었던 잡음이라 해도 정밀 구동기에서는 구동 분해능보다 잡음 신호의 크기가 큰 경우가 많다. 따라서, 센서의 잡음에 견실한 시스템을 설계하는 것이 중요하다.

셋째로는, 사용되는 기계 시스템의 강성과 감쇠가 낮다는 것이다. 정밀 위치 구동기는 대체로 크기가 작은 만큼 발생시키는 힘도 작다. 또, 감쇠 장치를 의도적으로 넣지 않는 한, 기계 장치 자체의 물질 감쇠가 작기 때문에 감쇠가 잘 일어나지 않는다. 이에 따라 오버슈트가 커지고 잔류 진동이 오래 지속되며 되먹임 이득이 큰 경우 쉽게 시스템이 불안정해진다.

본 연구에서는 구동기를 제외한 기구부는 선형 시스템으로 모델링하였으며, 구동기의 비선형성은 구조적인 불확실성으로 놓고 무-합성 방법을 적용하였다. 또한, 위치 결정 장치의 특성상 정상상태 오차를 제거하기 위해서 적분제어기를 적용하였다. 또한, 센서의 잡음이 시스템에 주는 영향을 최소화하도록 잡음이 주로 발생하는 영역인 고주파에서 전달함수가 최소가 되도록 하였다. 또한 전달함수의 공진 피크가 억제되도록 하는 방법을 통해 시스템의 감쇠를 증가시켰다.

## 2. 6 자유도 정밀 위치결정 스테이지의 모델링

6 자유도 위치결정 스테이지는 Fig. 1과 같은 형태로 제작되었으며, 그를 위한 선형적인 행렬 표현은 다음과 같다 [10].

$$M\ddot{\mathbf{x}} = -C\mathbf{R}_a\dot{\mathbf{x}} - K\mathbf{R}_a\mathbf{x} + K\mathbf{u} \quad (25)$$

여기서

$$\mathbf{x} = [x \quad y \quad z \quad \theta_x \quad \theta_y \quad \theta_z]^T \quad (26)$$

$$\mathbf{u} = [u_1 \quad u_2 \quad u_3 \quad u_4 \quad u_5 \quad u_6]^T \quad (27)$$

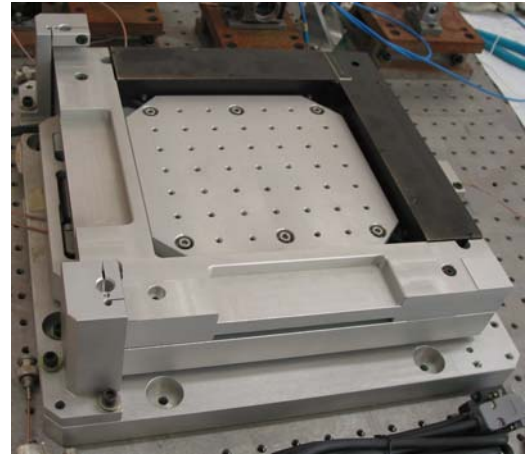


Fig. 1 Constructed 6-dof precision stage

$$M = \begin{bmatrix} m & & & & & \\ & m & & & & \\ & & m & & & \\ & & & I_{xx} & & \\ & & & & I_{yy} & \\ & & & & & I_{zz} \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$C = \begin{bmatrix} c_x & & & & & \\ & c_y & & & & \\ & & c_y & & & \\ & & & c_v & c_v & c_v \\ & & & L_3c_v & L_3c_v & -L_4c_v \\ & & & L_1c_v & -L_1c_v & \\ L_2c_y & -L_2c_y & & & & \end{bmatrix} \quad (29)$$

$$K = \begin{bmatrix} k_x & & & & & \\ & k_y & & & & \\ & & k_y & & & \\ & & & k_v & k_v & k_v \\ & & & L_3k_v & L_3k_v & -L_4k_v \\ & & & L_1k_v & -L_1k_v & \\ L_2k_y & -L_2k_y & & & & \end{bmatrix} \quad (30)$$

$$\mathbf{R}_a = \begin{bmatrix} 1 & & & & & \\ & 1 & & & -L_2 & \\ & & 1 & & & L_2 \\ & & & 1 & L_3 & L_1 \\ & & & & 1 & L_3 & L_1 \\ & & & & & 1 & -L_4 \end{bmatrix} \quad (31)$$

$$\mathbf{y} = C\mathbf{x} \quad (32)$$

여기서

$$\mathbf{y} = [s_1 \quad s_2 \quad s_3 \quad s_4 \quad s_5 \quad s_6]^T \quad (33)$$

$$C = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & & & & & \\ & 1 & & & & \\ & 1 & & & & P_1 \\ & & 1 & P_2/2 & P_3/2 & \\ & & 1 & -P_2/2 & -P_3/2 & \\ & & 1 & -P_2/2 & P_3/2 & \end{bmatrix} \quad (34)$$

### 3. 제어 구조의 설계

일반적인 뮤-합성 제어에서 일반화된 플랜트와 제어 구조는 Fig. 2 와 같다.

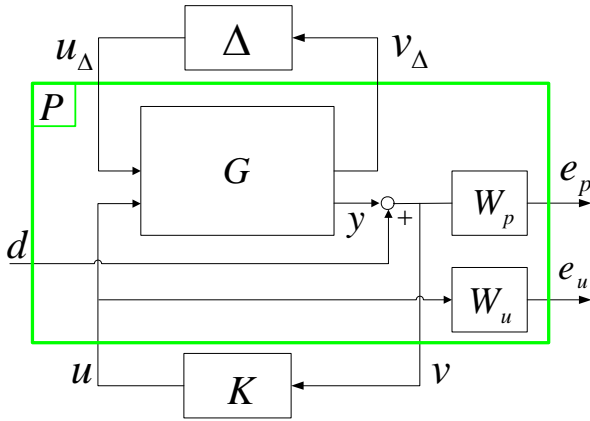


Fig. 2 Control structure by a generalized system representation

본 연구에서는 구동기의 비선형성은 구조적인 불확실성으로 놓고 뮤-합성 방법을 적용하였다. 압전 구동기의 이득이 최대 구동 범에서의 이득을 기준으로 할 때, 0.7~1.0의 범위의 비율로 구동됨을 실험을 통해 확인하였다. 이를 구조적인 급센형 불확실성으로 고려하였다.

위치 결정 장치의 특성상 정상상태 오차를 제거하기 위해서 적분 제어를 적용하였다. 뮤-합성에서 이를 제어기에 의도적으로 포함하는 것은 쉽지 않기 때문에 플랜트에 포함시켜서 뮤-합성 방법을 이용하여 제어를 설계한 후 이것을 제어기에 포함시키는 방법을 적용하였다.

또한, 센서의 잡음이 시스템에 주는 영향을 최소화하도록 잡음이 주로 발생하는 영역인 고주파에서 전달함수가 최소가 되도록 하고, 전달함수의 공진 피크가 억제되도록 하는 방법을 통해 시스템의 감쇠를 증가시켰다. 이는 가중 함수 Wp 와 Wu 를 적절히 선택하는 것을 통해 성취하였다.

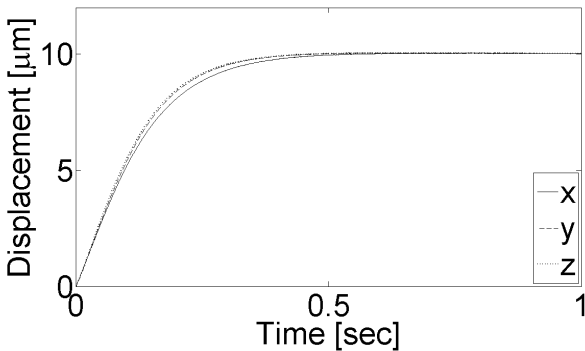


Fig. 3 Step responses of the controlled 6-dof precision stage

### 4. 결과 및 결론

제어기 개발의 대상인 6 자유도 스테이지가 각 자유도에 대해 100~200 Hz 사이의 첫번째 공진점을 갖도록 설계

되었기 때문에 개발된 제어기의 각 자유도에 대한 성질은 서로 비슷하다. 평행 운동에 대해서 개발된 제어기를 적용한 계단 응답 결과는 Fig. 3 과 같다.

정상상태 오차도 제거되었으며 2%의 정착시간도 약 0.3 초로서 초정밀 위치제어기로서는 만족할 만한 성능을 보여주고 있다.

### 후기

본 연구는 중소기업청과 서울특별시의 산학 공동기술개발에 의해 진행되었으며, 관계자 여러분들께 감사드립니다.

### 참고문헌

1. Shan, X., Kuo, S., Zhang, J. and Menq, C., "Ultra precision motion control of a multiple degrees of freedom magnetic suspension stage," IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 7 (1), 67-78, 2002.
2. Physik Instrumente (PI) GmbH homepage, 2009, www.physikinstrumente.com, accessed March 23, 2009.
3. Yao, Q., Dong, J. and Ferreira, P. M., "Design, analysis, fabrication and testing of a parallel-kinematic micropositioning XY stage," International Journal of Machine Tools & Manufacture, 47, 946-961, 2007.
4. Jinghua Zhong and Bin Yao, Member, Adaptive Robust Precision Motion Control of a Piezoelectric Positioning Stage, IEEE Transactions of control system technology, 16 (5), 1039-1046, 2008
5. N. Henmi, K. Sato, S. Wada and A. Shimokohbe, A six-degree of freedom fine motion mechanism Mechatronics, 2 (5), 445-457, 1992.
6. Soo S. Lee, Jang M. Lee, Design of a general purpose 6-DOF haptic interface, Mechatronics, 13, 697-722, 2003.
7. Yan Jin, I-Ming Chen, Guilin Yang, Kinematic design of a family of 6-DOF partially decoupled parallel manipulators, Mechanism and Machine Theory, doi:10.1016/j.mechmachtheory.2008.06.004
8. Ioannis Davliakos, Evangelos Papadopoulos, Model-based control of a 6-dof electrohydraulic Stewart-Gough platform, Mechanism and Machine Theory, 43, 1385-1400, 2008.
9. Shih-Kang Kuo and Chia-Hsiang Menq, Modeling and Control of a Six-Axis Precision Motion Control Stage, IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS, VOL. 10, NO. 1, pp. 50-59, FEBRUARY 2005.
10. Moon, J. H., Park, J. H. and Pakh, H. J., "Design and Modeling of a 6-dof Stage for Ultra-Precision Positioning," J. of KSPE, 26 (6), 2009.