

6자유도 정밀 스테이지의 추종제어를 위한 슬라이딩 모드 제어기 설계

문준희*, 이봉구⁺

(논문접수일 2010. 09. 27, 심사완료일 2010. 11. 23)

Design of a Robust Position Tracking Controller with Sliding Mode for a 6-DOF Micropositioning Stage

Jun-Hee Moon*, Bong-Gu Lee⁺

Abstract

As high precision industries such as semiconductor, TFT-LCD manufacturing and MEMS continue to grow, the demand for higher DOF precision stages has been increasing. In general, the stages should accommodate a prescribed range of payloads in order to position various precision manufacturing/inspection instruments. Therefore a nonlinear controller using sliding motion is developed, which bears mass perturbation and makes the upper plate of the stage move in 6 DOF. For the application of the nonlinear control, an observer is also developed based on expected noise covariance. To eliminate the steady state error of step response, integral terms are inserted into the state-space model. The linear term of the controller is designed using optimization scheme in which parameters can be weighted according to their physical significance, whereas the nonlinear term of the controller is designed using trial and error method. A comprehensive simulation study proves that the designed controller is robust against mass perturbation and completely eliminates steady state errors.

Key Words : Precision Stage (정밀 스테이지), Sliding Mode Control (슬라이딩 모드 제어), Steady-State Error Elimination (정상상태오차 제거), Performance Index (성능지수)

1. 서론

반도체 및 디스플레이 산업의 발전에 따라 초정밀 위치결정 기구의 필요성이 증대되고 있다⁽¹⁾. 초정밀 위치 결정기구라 함은 마이크로/나노 미터 수준의 해상도와 반복정밀도로 엔드 이펙터(end-effector)를 작업공간 내의 원하는 위치로 이송하는 장치를 의미한다.

이러한 장치는 VLSI 등의 반도체 제조와 TFT-LCD 제조 공정에서 사용되는 사진식각공정(photolithography)에서 많이 사용되고 있으며, 원자현미경(AFM)이나 주사현미경(SPM)과 같은 정밀 측정기구에서도 사용된다. 또한 MEMS (Micro Electro-Mechanical Systems)나 의공학 분야에서도 활발히 사용되고 있다⁽²⁻⁵⁾.

현재 주로 2, 3 자유도의 위치 결정기구를 통해 시행이 되고

* 대림대학 메카트로닉스과 (jhmoon@daelim.ac.kr)
주소: 431-715 경기도 안양시 동안구 비산동 526-7

+ 대림대학 기계설계과

있는 초정밀 위치결정기구⁽³⁻⁷⁾, 각종 산업에서 요구되는 정밀도의 향상에 따라 그 이상의 자유도를 필요로 하고 있으므로 좀 더 많은 자유도의 이송이 가능한 스테이지의 개발의 필요성이 증대되고 있으며, 여러 광학 장비 제조사에서 다자유도 위치결정장치가 개발되고 있다⁽⁸⁻⁹⁾.

Liaw 등⁽¹⁰⁾은 압전 구동기의 추종제어를 위해 향상된 슬라이딩 모션을 개발하여 제어에 활용하였다. 제안된 제어 방법은 히스테리시스 효과와 모델링 되지 않은 동특성을 포함한 계수들의 불확실성을 수용하기 위해 설계된 것이다. 이 방법의 장점은 예상되는 시스템 변수와 외란의 변동 폭만 알면 강인한 제어가 가능하다는 것이다. Zuo 등⁽¹¹⁾은 적분항을 넣어서 슬라이딩 모드 제어를 만들어 진동 절연을 위해 필요한 감쇠장치를 구현하였다. 이러한 방법은 기초에서 전달되는 진동을 측정할 필요가 없으며 동특성의 보상에 의한 높은 성능의 제어가 가능하다는 점이다. Tai 등⁽¹²⁾은 이산시간 계통 슬라이딩 모드 제어 방법을 듀얼 스테이지에 대해 적용하여 경계가 있는 변수 변동과 외란에 대해서도 강인한 추종제어를 이루었다. 듀얼 스테이지를 사용하였으므로 큰 변위 영역을 미세한 정밀도로 제어가 가능하였다. 이론적으로 외란의 경계 안에서 준-슬라이딩 모드가 실행되어 떨림이 경감된 시스템이 되도록 페루프 시스템을 완성하였으며 실험적으로 제안된 방법의 우수성을 증명하였다. Park 등⁽¹³⁾은 6자유도 병렬 기구를 위한 섭동 관측기를 가진 슬라이딩 모드 제어를 제안하였다. 비선형이나 불확실성이 있는 항을 포함하고 있는 제어 대상계에 대해서 리아푸노프 접근법에 의해 제어를 설계하였으며 섭동 관측기는 퍼지 적응 망에 기초하였다. 퍼지 적응망의 가중 변수는 적응 법칙에 따라 실시간으로 갱신되게 하였으며 예측 오차영역에 접근하도록 하였다. 개발된 제어기와 관측기의 성능은 시뮬레이션에 의해 검증하였다.

이와 같은 선행연구를 살펴보면 다음과 같은 통찰력을 얻을 수 있다. 슬라이딩 모드 제어는 시스템의 불확실성이나 비선형성이 있어도 어느 특정한 범위 안에서는 원하는 제어 성능을 발휘하도록 설계할 수 있다는 것과 명령 추종 성능을 위해서는 적분항이 반드시 추가가 되어야 한다는 점이다. 본 연구에서는 이러한 선행연구에 진일보해서 6자유도의 정밀 스테이지에 슬라이딩 모드 제어를 적용하고자 한다. 6자유도에 대해 적용한 사례는 매우 드물며 Park 등⁽¹³⁾이 적용한 방법은 상태의 적분항을 다루고 있지 않아서 추종제어에 반드시 필요한 정상상태 오차 제거에 한계가 있다. 따라서, 본 연구에서는 6자유도 스테이지에 하중의 변동에도 강인한 성능을 갖도록 슬라이딩 모드 제어를 적용하였으며 정상상태 오차를 제거하기 위해 적분항을 상태에 포함하여 제어를 설계하였다.

2. 질량변동을 고려한 6자유도 스테이지의 모델링

개발된 6자유도 정밀 스테이지는 구동부, 제어부, 센서부, 상판(上板), 하판(下板)으로 구성되어 있는 병렬 기구이다. 구동부는 압전소자(구동범위: 25mm)와 전후의 플렉서 부분으로 구성되어 있으며, 센서부는 정전용량형 간격센서(측정범위: 50mm)와 고정 치구로 구성되어 있고, 제어를 위한 신호처리기는 dSpace DS-1103에 의해 수행되었다.

개발된 스테이지의 분해도는 Fig. 1과 같다. 수평방향의 구동부와 수직방향의 구동부는 각각 상판과 하판에 양끝이 닿아 있으며, 상판의 질량과 회전관성 모멘트는 다음과 같다. $m=12.86$ kg, $I_{xx}=0.086$ kg·m², $I_{yy}=0.091$ kg·m², $I_{zz}=0.166$ kg·m².

상판에 작동되는 힘의 작용점과 센서의 위치를 Fig. 2에 도시하였다. Fig. 2에 도시된 스테이지의 주요 치수는 다음과 같다. $L1=115$ mm, $L2=144$ mm, $L3=52$ mm, $L4=104$ mm, $P1=65$ mm, $P2=P3=280$ mm. 또한, S1~S6는 스테이지의 움직임을 측정할 센서의 위치를 표시한 것이다. A1, A2, A3는 각각 수평구동기와 상판과의 접촉점이고 화살표는 방향을 의미하며, A4, A5, A6는 수직구동기와 상판과의 접촉점으로서 지면에 수직인 방향으로 움직인다. 이러한 접촉점에서의 변위를 Fig. 1에서 $q_1 \sim q_6$ 으로 표시하였으며, 이 변위들과 전체 좌표 사이의 관계는 식 (1)-(4)와 같다.

$$q = R_a x \tag{1}$$

$$x = [x \ y \ z \ \theta_x \ \theta_y \ \theta_z]^T \tag{2}$$

$$q = [q_1 \ q_2 \ q_3 \ q_4 \ q_5 \ q_6]^T \tag{3}$$

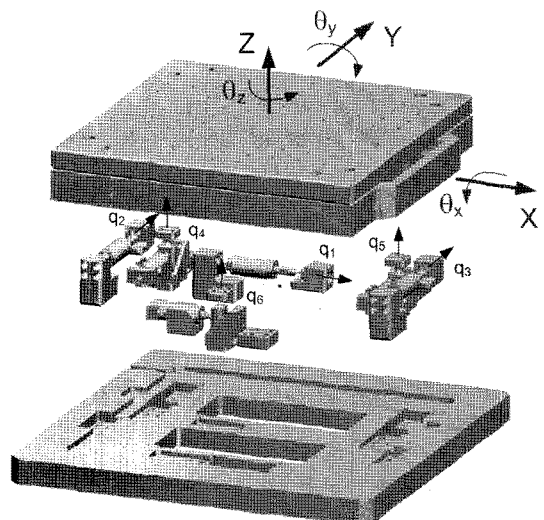


Fig. 1 Exploded view of the developed 6-DOF precision stage

$$R_a = \begin{bmatrix} 1 & & & & & \\ & 1 & & & -L_2 & \\ & & 1 & & & L_2 \\ & & & 1 & L_3 & L_1 \\ & & & & 1 & L_3 & L_1 \\ & & & & & 1 & -L_4 \end{bmatrix} \quad (4)$$

정밀 스테이지의 각 구동부에서 생성되는 변위는 $u_1 \sim u_6$ 로, 기계적인 성질은 스프링과 댐퍼로 모델링을 하였으며, 이를 Fig. 3에 도시하였다. 선행연구⁽¹⁴⁾에서 전달을 비교를 통해 구한 스프링 상수와 감쇠계수의 값은 다음과 같다.

$k_x = 1.37 \times 10^7 \text{N/m}$, $k_y = 7.9 \times 10^6 \text{N/m}$, $k_z = 4.7 \times 10^6 \text{N/m}$, $c_x = 351 \text{N}\cdot\text{s/m}$, $c_y = 202 \text{N}\cdot\text{s/m}$, $c_z = 78.1 \text{N}\cdot\text{s/m}$, Fig. 3의 모델을 이용하여 상판의 동역학을 디스크립터 상태공간으로 표현하면 다음과 같다.

$$E\dot{y} = A_y + B_v \quad (5)$$

$$z = C_y \quad (6)$$

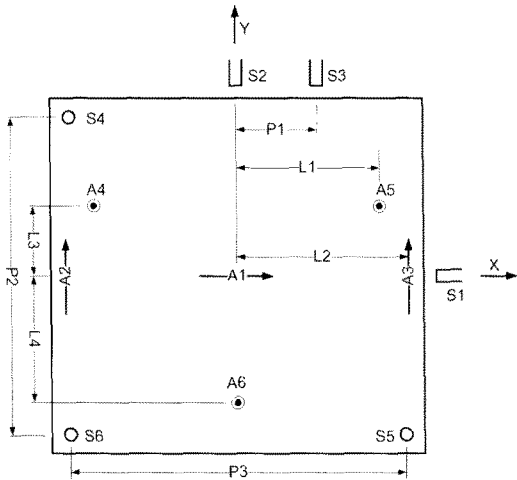


Fig. 2 Plane view of the developed 6-DOF precision stage

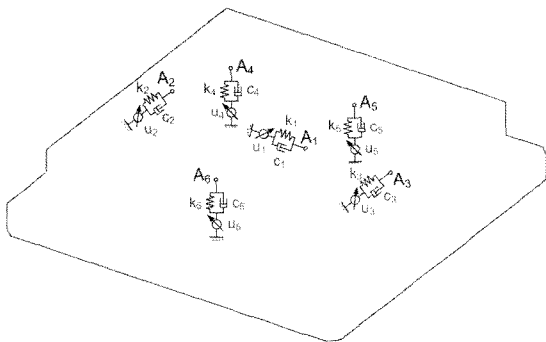


Fig. 3 Equivalent springs, dampers and motion generators of the actuation modules

여기서

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -KR_a & -DR_a \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$B = [0 \quad KR_a]^T \quad (8)$$

$$C = [R_s \quad 0]^T \quad (9)$$

$$E = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & M \end{bmatrix} \quad (10)$$

또한, 상태벡터 y 와 제어입력 v 는 다음과 같다.

$$y = [y_1 \quad y_2]^T = [x \quad \dot{x}]^T \quad (11)$$

$$v = R_a^{-1}u \quad (12)$$

$$u = [u_1 \quad u_2 \quad u_3 \quad u_4 \quad u_5 \quad u_6]^T \quad (13)$$

위의 표현에서 사용되는 행렬들은 다음과 같다.

$$M = \text{diag}(m, m, m, I_{xx}, I_{yy}, I_{zz}) \quad (14)$$

$$D = \begin{bmatrix} c_x & & & & & \\ & c_y & c_y & & & \\ & & & c_z & c_z & c_z \\ & & & L_3 c_z & L_3 c_z & -L_4 c_z \\ & & & L_1 c_z & -L_1 c_z & \\ L_2 c_y & -L_2 c_y & & & & \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$K = \begin{bmatrix} k_x & & & & & \\ & k_y & k_y & & & \\ & & & k_z & k_z & k_z \\ & & & L_3 k_z & L_3 k_z & -L_4 k_z \\ & & & L_1 k_z & -L_1 k_z & \\ L_2 k_y & -L_2 k_y & & & & \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$R_s = \begin{bmatrix} 1 & & & & & \\ & 1 & & & & \\ & & 1 & & & \\ & & & 1 & P_2/2 & P_3/2 \\ & & & & 1 & -P_2/2 & -P_3/2 \\ & & & & & 1 & -P_2/2 & P_3/2 \end{bmatrix} \quad (17)$$

3. 제어기의 설계

2장에서 개발된 모델에 포함되어 있는 스프링 상수나 감쇠 계수는 일단 개발이 완료되면 변동이 되지 않는 계수들이다. 하지만, 하중의 경우에는 정밀 스테이지가 적용되는 가공기나 측정기에 따라 변동하게 되어 일정 범위의 하중의 변동을 감당할 수 있어야 한다. 하중의 변동을 고려하기 위해서 비선형 제어의 한 방법인 슬라이딩 모드 제어를 적용하였다^(15,16).

3.1 슬라이딩 모드 제어기의 설계

정밀 스테이지는 추종제어의 목적으로 사용되므로 적분제어의 적용이 일반적이다. 슬라이딩 모드 제어에 적분제어 기법을 사용하려면 제어대상계에 추종오차의 적분값을 상태변수에 포함시킴으로 가능하게 된다. 본 연구에서는 상태변수 x 와 지령값 r 의 차이를 추종오차로 사용하며 적분값은 식(18)와 같이 표현되며, 시스템의 표현 식 (5)는 변수 q 와 지령값 r 을 포함하여 식(19), (20)과 같이 상태가 증가된 시스템 표현으로 바꿀 수 있고 (여기서 $A' = E^{-1}A, B' = E^{-1}B$ 이다), 이는 식 (21), (22)와 같다.

$$q = \int_0^t (r-x) dt \quad (18)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{q} \\ \dot{y}_1 \\ \dot{y}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -I & 0 \\ 0 & A'_{11} & A'_{12} \\ 0 & A'_{21} & A'_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q \\ y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ B'_1 \\ B'_2 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} r \quad (19)$$

$$z = [0 \ C_1 \ C_2] [q \ y_1 \ y_2]^T \quad (20)$$

$$\dot{\tilde{y}} = \tilde{A}\tilde{y} + \tilde{B}v + E_r \quad (21)$$

$$z = \tilde{C}\tilde{y} \quad (22)$$

일반적으로 슬라이딩 모드 제어를 적용하기 전에 제어 행렬 \tilde{B} 을, 계수(rank) m 의 차수를 갖는 정방행렬과 $n-m$ 차수의 영행렬로 분리하는(여기서 n 은 상태변수의 차수이다) 직각 변환을 하는 것이 일반적이나, 개발된 시스템은 각 축간의 직교성으로 인해 이러한 작업이 필요하지 않게 되어 바로 절환함수의 설계로 들어간다. 각 변수가 가지는 중요도를 고려하여 체계적으로 초평면을 설계하기 위해 2차 최적조정기법을 사용한 다. 절환함수 설계를 위한 행렬의 형태는 다음과 같다.

$$\tilde{A}_{11} = \begin{bmatrix} 0 & -I \\ 0 & A'_{11} \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$\tilde{A}_{12} = \begin{bmatrix} 0 \\ A'_{12} \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$\tilde{A}_{21} = [0 \ A'_{21}] \quad (25)$$

$$\tilde{A}_{22} = A'_{22} \quad (26)$$

$$\tilde{y}_1 = [z \ y_1]^T \quad (27)$$

$$\tilde{y}_2 = y_2 \quad (28)$$

초평면을 구성하는 절환함수를 다음과 같이 정한다⁽¹⁷⁾.

$$\sigma = S\tilde{y} = [S_1 \ I] \begin{bmatrix} \tilde{y}_1 \\ \tilde{y}_2 \end{bmatrix} = S_1\tilde{y}_1 + \tilde{y}_2 \quad (29)$$

행렬 S 는 다음과 같이 2차의 성능지수의 최소화를 통해 결정을 하도록 하였다.

$$J = \frac{1}{2} \int_0^t \tilde{y}^T Q \tilde{y} dt \quad (30)$$

여기서 Q 를 대각행렬로 선택하면($Q_{i,j} = 0 (i \neq j)$), 식(30)는 식(31)와 같이 된다.

$$J = \frac{1}{2} \int_0^t \tilde{y}_1^T Q_{11} \tilde{y}_1 + \tilde{y}_2^T Q_{22} \tilde{y}_2 dt \quad (31)$$

J 를 최소로 하는 해는 식 (32)과 같으며, 양의 한정 대칭 행렬 P 는 식 (33)의 리카티 방정식을 통해 얻어지며 본 연구에서는 MATLAB을 통해 계산하였다.

$$\tilde{y}_2 = -Q_{22}^{-1} \tilde{A}_{12}^T P \tilde{y}_1 \quad (32)$$

$$P \tilde{A}_{11} + \tilde{A}_{11}^T P - P \tilde{A}_{12} Q_{22}^{-1} \tilde{A}_{12}^T P + Q_{11} = 0 \quad (33)$$

초평면은 절환함수가 0이 되는 평면이므로 초평면에서 식 (29)은 다음을 만족한다.

$$\sigma = S_1\tilde{y}_1 + \tilde{y}_2 = 0 \quad (34)$$

이를 식 (32)과 비교하면 다음과 같은 결과를 얻는다.

$$S_1 = Q_{22}^{-1} \tilde{A}_{12}^T P \quad (35)$$

다음으로 제어입력은 다음과 같이 결정된다.

$$v = v_1 + v_n \quad (36)$$

여기서 선형입력 v_1 은 초평면에서 절환함수의 시간적 변화율이 0이며, 위치지령이 대부분의 구간에서 변화하지 않으므로 식 (21)을 통해 다음과 같이 구할 수 있다.

$$v_1 = -(SB)^{-1} SA\tilde{y} \quad (37)$$

비선형입력 v_n 은 초평면에 상태 변수를 항상 구속시키기 위해서 사용된다. 본 연구에서는 최종 슬라이딩 모드 제어 기법을 사용하며, 채터링을 방지하기 위해 평활함수를 이용하여 유사 슬라이딩(pseudo-sliding)이 되도록 하였다. 따라서 비선형입력은 다음과 같다.

$$v_n = \begin{bmatrix} -\lambda_i \frac{\sigma_i}{|\sigma_i| + \delta_i} \end{bmatrix} \quad \delta_i > 0 \quad (38)$$

여기서 λ_i 와 δ_i 는 각 자유도에 대해서 적절히 선택을 해야 하는 계수들이다. Q , λ_i 와 δ_i 는 제어기의 성능을 결정하는 열쇠와 같은 값들이어서 이것만 결정되면 제어기가 식 (33)~(38)에 의해서 결정이 된다.

3.2 잡음의 영향을 고려한 관측기의 설계

슬라이딩 모드 제어기를 사용하기 위해서는 상태벡터의 모든 변수를 관측하여야 한다. 본 연구에서는 예상되는 외란과 측정잡음의 상호분산(covariance)을 이용하여 칼만-부시 필터를 채용한 관측기를 설계한다.

제어기와 관측기를 포함한 전체 시스템을 Fig. 4에 도시하였으며, 관측기를 통해 예측되는 상태를 \hat{y} 라 하면 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$e = y - \hat{y} \quad (39)$$

$$\dot{e} = A_e e \quad (40)$$

$$A_e = A - LC \quad (41)$$

$$B_e = B \quad (42)$$

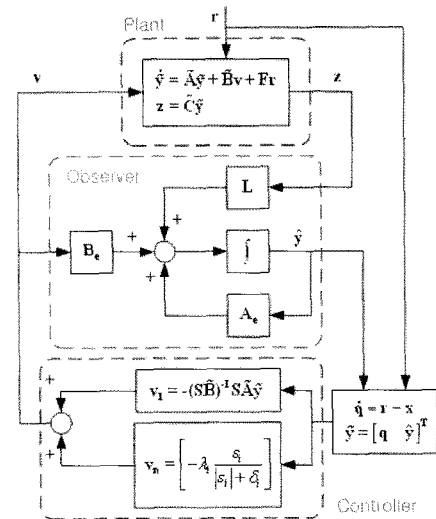


Fig. 4 Flow chart of the overall control system

여기서 L 은 시스템 출력을 관측기 입력으로 변환하는 행렬로서, $E\{(z - \hat{z})^T (z - \hat{z})\}$ 를 최소화하도록 선택하면 다음과 같다⁽¹⁸⁾.

$$L = P_1 C^T R_1^{-1} \quad (43)$$

여기서 P_1 은 MATLAB을 통해 계산이 가능한 관측기를 위한 리카티 방정식의 해이며 Q_1 과 R_1 은 각각 외란과 측정잡음의 상호분산이고, 다음 식을 만족시킨다.

$$P_1 A^T + A P_1 + Q_1 - P_1 C^T R_1^{-1} C P_1 = 0 \quad (44)$$

그러므로 Q_1 과 R_1 을 사용하여 식 (43)과 (44)을 통해 관측기를 설계한다.

4. 질량과 회전관성의 변화에 따른 제어성능 고찰

본 연구에서 사용한 슬라이딩 모드 제어기 설계법은 전술한 바와 같이 Q , λ_i 와 δ_i 의 계수들을 선택하면 체계적으로 결정된다. 또한 그 계수들은 물리적인 의미를 가지고 있으므로 그 의미를 이용하여 선택한다. λ_i 는 시스템의 상태가 초평면에 근접하는 속도를 조절하는 변수이고 δ_i 는 시스템의 상태가 초평면을 전후로 채터링하는 것을 방지하기 위한 변수이다. 또한 식 (28)에서 알 수 있듯이 Q 의 처음 6개의 대각원소는 정상상태오차를 줄이는 속도를 조절하는 계수이며, 다음 6개의 대각원소는 시스템의 속도를 향상시키는 계수이고, 다음 6개의 대각원소는 시스템의 감쇠를 향상시키는 계수이므로 이러한 점을 고려하여 변수를 선택하였다.

먼저 개발된 스테이지를 안정적으로 제어하는 Q , λ_i 와 δ_i 를 시행착오를 통해 구하였으며, 그 값은 다음과 같다.

$Q = \text{diag}(10 \times I, I, 0.1 \times I)$, $\lambda_i = 0.2$, $\delta_i = 10$ 이 설계변수들을 이용하여 3장에서 설명한 방법으로 제어기를 설계하였으며, 설계된 제어기를 적용하여 계단응답을 수행한 시뮬레이션 결과는 x축 방향에 대해 Fig. 5와 같다. 슬라이딩 모드 제어기는 비선형성으로 인해 주파수 영역의 해석기법을 적용할 수 없으므로 시간영역의 대표적인 해석 기법인 계단 응답을 사용하였다. 또한, 산업현장에서 사용되는 정밀 스테이지의 대부분이 계단 입력에 의해 위치제어를 수행하고 있으므로 성능의 검증에 계단 입력을 사용하는 것이 적절하다.

다음으로 스테이지 위에 하중 13kg의 물체가 올려진 경우(상판의 자중 12.8kg까지 포함하면 25.86kg) x축 방향으로 계단 응답을 수행하면 Fig. 6과 같다. 그림에서 볼 수 있듯이 질량 섭동에 의해 채터링이 발생하며, 이는 정밀 스테이지와 같이 감쇠가 작은 시스템에는 치명적인 약점이 된다.

따라서 Table 1과 같은 관성의 섭동이 있어도 견실한 성능을 갖는 제어기의 설계변수를 다음과 같이 구하였다. $Q =$

$\text{diag}(10 \times I, I, 0.1 \times I)$, $\lambda_i = \text{diag}(0.2, 0.2, 0.2, 0.25, 0.15, 0.12)$, $\delta_i = 100$. Fig. 7과 8은 제어기가 질량섭동에 대해서도 채터링과 정상상태오차가 없이 견실한 성능을 나타내고 있음을 입증한다.

슬라이딩 모드 제어에서 상태가 초평면에 도달하면(즉, 절환함수가 0이 되면) 원래 시스템의 고유한 특성이 사라지게 되므로, 각 자유도에 대해서 거의 같은 형태의 절환함수를 갖는 제어기를 적용할 때의 계단응답은 각 자유도에 대해서 거의 같은 응답을 가진다. 따라서 병진운동(x, y, z)의 계단응답은 x방향에 대한 응답만 대표적으로 Fig. 7에 나타내었으며, 회전운동($\theta_x, \theta_y, \theta_z$)에 대해서는 마찬가지로 θ_x 방향에 대해서만 Fig. 8에 나타내었다. 초평면에서는 절환함수가 0이 되므로, 스테이지의 상태가 신속하게 초평면에 도달하는 것을 Fig. 7(b)와 Fig. 8(b)에서 관찰할 수 있다.

Table 1 Bounds of parameter perturbation

Parameter	Minimum	Maximum
m [kg]	12	28
I_{xx} [$\text{kg}\cdot\text{m}^2$]	0.078	0.182
I_{yy} [$\text{kg}\cdot\text{m}^2$]	0.078	0.182
I_{zz} [$\text{kg}\cdot\text{m}^2$]	0.15	0.35

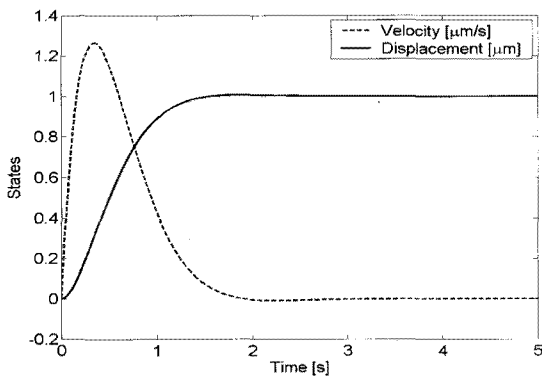


Fig. 5 Step response of the controlled system in x-direction (with no mass perturbation)

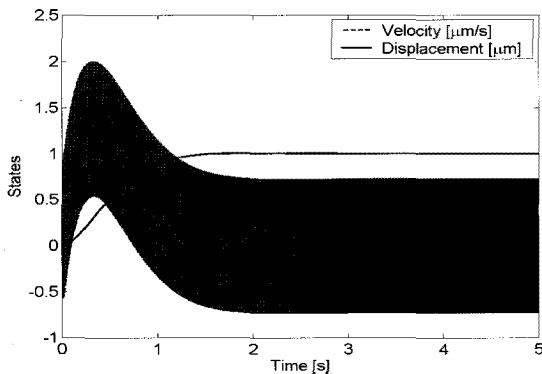
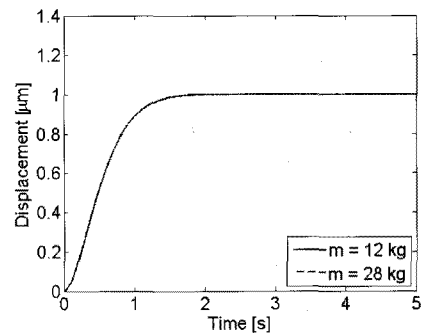
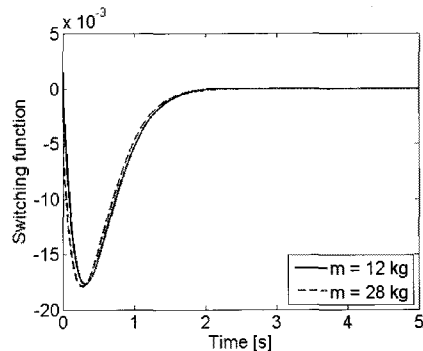


Fig. 6 Step response of the controlled system in x-direction (with additional mass of 13kg)

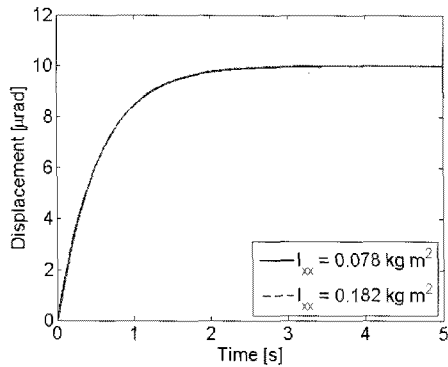


(a) step response

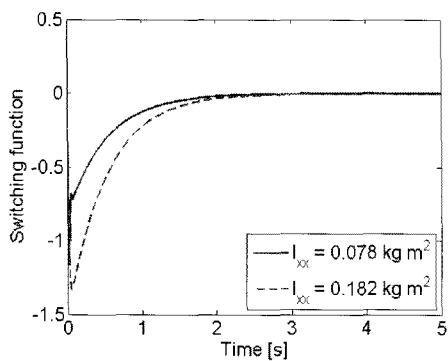


(b) switching function

Fig. 7 Step response and switching function of the robustly controlled system in translational (x-) direction



(a) step response



(b) switching function

Fig. 8 Step response and switching function of the robustly controlled system in rotational (θ_x) direction

5. 결론

본 연구의 의의는 6자유도 정밀 스테이지가 하중에 변동에도 강인한 제어를 수행하며 정상상태오차 없이 추종제어를 할 수 있도록 슬라이딩 모드 제어를 설계하는 데에 있다. 본 연구의 결과는 다음과 같다.

- (1) 6자유도 정밀 스테이지에 올려지는 하중과 회전관성모멘트의 변화에도 원하는 제어 성능을 얻을 수 있도록 비선형 제어의 일종인 슬라이딩 모드 제어를 설계하였다.
- (2) 계단 입력에 대한 정상상태오차가 제거되도록 적분항이 포함된 상태를 이용한 상태공간모델을 구현하였다.
- (3) 각 변수의 중요도를 반영할 수 있는 최적화 기법을 이용하여 슬라이딩 모드 제어기의 선형제어부분을 설계하였다.
- (4) 시뮬레이션을 통해 하중과 회전관성의 변화에 따른 견실성이 크며 정상상태오차를 완전히 제거하는 제어를 설계하였음을 입증하였다.

참고 문헌

- (1) Gordon, C. G., 1991, "Generic Criteria for Vibration-Sensitive Equipment," *Proc. of International Society for Optical Engineering (SPIE)*, Vol. 1619, pp. 71~85.
- (2) Shan, X., Kuo, S., Zhang, J., and Menq, C., 2002, "Ultra Precision Motion Control of a Multiple Degrees of Freedom Magnetic Suspension Stage," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 7, No. 1, pp. 67~78.
- (3) Sugihara, K., Mori, I., Tojo, T., Ito, C., Tabata, M., and Shinozaki, T., 1989, "Piezoelectrically driven XY table for submicron lithography systems," *Rev Scientific Instruments*, Vol. 60, No. 9, pp. 3024~3029.
- (4) Smith, A. R., Gwo, S., and Shih, C. K., 1994, "A New High-Resolution Two-Dimensional Micropositioning Device for Scanning Probe Microscopy Applications," *Rev. of Scientific Instruments*, Vol. 65, No. 10, pp. 3216~3219.
- (5) Muthuswamy, J., Salas, D., and Okandan, M., 2002, "A Chronic Micropositioning System for Neurophysiology," *Proc the Second Joint EMBS/BMES Conference*, Houston, TX, USA, 23~26 October, pp. 2115~2116.
- (6) Cho, B., and Seong, H., 2010, "The Design of Sliding Mode Controller for Precision Stage Using Genetic Algorithm," *Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 19, No. 1, pp. 101~107.
- (7) Yang, H. S., and Lee, G. B., 2006, "Sliding Mode Control of Manipulator Using Neural Network," *Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 15, No. 5, pp. 114~122.
- (8) Newport corporations webpage, Parallel kinematics HXP100-MECA, viewed 4 November 2010, <<http://www.newport.com>>.
- (9) Piezomechanik GmbH webpage, Hexapods, viewed 4 November 2010, <<http://www.piezomechanik.com>>.
- (10) Liaw, H. C., Shirinzadeh, B., and Smith, J., 2007, "Enhanced Sliding Mode Motion Tracking Control of Piezoelectric Actuators," *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 138, No. 1, pp. 194~202.
- (11) Zuo, L., and Nayfeh, S. A., 2004, "An Integral Sliding Control for Robust Vibration Isolation and Its Implementation," *Proceedings of SPIE*, Vol. 5386, pp. 1~10.
- (12) Tai, T. L., and Chen, J. S., 2005, "Discrete-Time

- Sliding-Mode Controller for Dual-Stage Systems - A Hierarchical Approach," *Mechatronics*, Vol. 15, No. 8, pp. 949~967.
- (13) Park, M. K., Lee, M. C., and Go, S. J., 2002, "The Design of Sliding Mode Controller with Perturbation Observer for a 6-DOF Parallel Manipulator," *ISIE 2001 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Vol. 3, pp. 1502~1507.
- (14) Moon, J. H., Park, J. H., and Pahk, H. J., 2009, "Design and Modeling of a 6-DOF Stage for Ultra-Precision Positioning," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 26, No. 6, pp. 106~113.
- (15) Utkin, V., 1977, "Variable Structure Systems with Sliding Modes," *IEEE Transactions on Automatic control*, Vol. 22, No. 2, pp. 212~222.
- (16) Saaj, M. C., Bandyopadhyay, B., and Unbehauen, H., 2002, "A New Algorithm for Discrete-Time Sliding-Mode Control using Fast Output Sampling Feedback," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 49, No. 3, pp. 518~523.
- (17) Edwards, C., and Spurgeon, S. K., 1998, *Sliding Mode Control: Theory and Applications*, Taylor & Francis Ltd., UK.
- (18) Skogestad, S., and Postlethwaite, I., 1996, *Multivariable Feedback Control: Analysis and Design*, Wiley, New York.