

슬라이딩 모드 제어에 기초한 유연한 2링크 조작기의 진동제어

채승훈* · 양현석** · 박영필***

Vibration Control of a Flexible Two-link Manipulator based on the Sliding Mode Control

Seung Hoon Chae, Hyun Seok Yang and Young Phil Park

Key Words: 2 flexible-link robot manipulator, multi variable-structured frequency shaped optimal sliding mode, vibration control

Abstract

In order to not only perform as a extreme model under the severe operating condition but also acquire more diverse and advanced control capability utilizing high compliance, active vibration control of a flexible 2-link robot manipulator are investigated. Multi variable-structured frequency shaped optimal sliding mode is proposed for the flexible robot manipulator like control system, whose control variables, an angular motion of joint and vibration of flexible link, have to be controlled simultaneously by one control torque at a driving joint. The control system is divided into two subsystems, a control input related subsystem and an added subsystem. The proposed sliding mode, composed of multi control variables, makes optimized relation between subsystems and a individual control input, thus, the sliding mode controller can compensate whole dynamics of each subsystems simultaneously. And the possibility and effectiveness are verified by vibration control of a manipulator having two flexible links. Simulation and experiment results show that the proposed control scheme achieves the purpose effectively.

1. 서 론

로봇 조작기의 사용이 확대되며 작업조건이 고하중, 고속화됨에 따라, 강제로만 고려되었던 로봇 조작기의 구조에서 탄성거동이 유발되어 제어 성능의 제한 및 작업 정밀도의 저하 등의 문제가 유발되었다. 이에 대한 제한적인 구조적, 기구학적 해결방안에 비하여 한편에서는 로봇 조작기를 강체가 아닌 탄성체로 적극적으로 고려하며, 탄성거동을 수동적으로 또는 능동적으로 빠르게 억제함으로써 로봇 조작기의 작업단의 위치정밀도를 빠르게 향상시키는 진동제어연구가 이루어져

왔다. 1975년 Book등[1]에 의하여 로봇 조작기의 유연성이 고려된 능동제어에 의한 정밀도 한계의 극복 가능성과 이러한 진동제어의 중요성이 제기된 이후, 유연한 로봇 조작기 제어방법에 대한 본격적인 연구가 이루어졌다. 초기에는 선형화에 의한 선형제어이론의 적용연구가 대부분이었지만 유연한 링크의 개수가 확대되거나 보다 극한 구동조건인 경우, 점차 비선형제어가 요구되기 시작하였다. 1991년 Nathan과 Singh[2]은 유연한 로봇 팔의 비선형성을 고려한 회전각의 슬라이딩 모드 제어를 실시 후, 로봇 팔이 목표위치에 도달하였을 때 극배치법에 의한 선형 진동제어의 모의실험을 연구하였다. 1993년 K. David Young [3] 등은 슬라이딩 모드에 대한 주파수 성형 보상기(frequency shaping compensator) 설계기법을 제시하고 유연한 로봇 팔에 적용하여 회전 구동

* 연세대학교 기계공학과 대학원
** 연세대학교 기계공학과
*** 연세대학교 기계공학과

시 유연한 링크의 진동이 유발되지 않도록 하는 수동적 제어기법을 연구하였다. 이후에도 여러 연구자들에 의하여 지속적으로 연구되고 있다.

본 연구에서는 2개의 유연한 링크로 구성된 로봇 조작기의 진동제어를 수행하고자 한다. 연구의 대상계로서 유연한 다자유도 로봇 조작기 계는, 동역학적으로 로봇 자체의 형상에 따른 비선형성 외에도 유연한 링크의 탄성거동에 의하여 높은 비선형성을 갖는다. 그리고 제어의 측면에서는 제한된 제어입력으로 보다 많은 수의 제어대상변수 즉 회전운동계 및 링크의 진동을 동시에 제어하여야 하는 제어입,출력의 수에 따른 관계특성을 갖는다. 예를 들어 별도의 진동제어용 작동기 없이 자체 관절의 작동기만으로 유연한 링크의 회전운동과 진동제어를 동시에 실시하는 유연한 로봇 조작기의 경우에 이러한 제어적 특성을 갖는다. 이 외에 오버헤드 크레인(overhead crane)과 도립진자(inverted pendulum) 등의 시스템도 일반적으로 같은 특성을 나타낸다.

제어입출력 특성의 계를 수식적으로 정의하기 위하여 유연한 로봇 조작기의 시스템을 예로 들어본다. 고려할 전체 대상계는 수평면상의 2개의 유연한 링크와 2개의 회전관절로 직렬 구성된 로봇 조작기 계이다. 대상계를 그림 1에 나타내었다. 동역학 모델링을 수행한 결과적인 지배방정식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} H_{\theta\theta} & H_{\theta q} \\ H_{q\theta} & H_{qq} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\theta} \\ \ddot{a} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{\theta\theta} & C_{\theta q} \\ C_{q\theta} & C_{qq} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{a} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & K_{qq} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \theta \\ a \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix} \tau \quad (1)$$

여기서 관절 회전각은 $\theta = \{\theta_1, \theta_2\}^T$ 이고 진동변위 일반화 좌표는 $a = \{a_1, a_2\}^T$ 이다. 이때 외팔보로 가정된 각 링크계는 지배적인 1차 진동 모드만을 고려한다. 그리고 구동축 상의 제어 토크는 $\tau = \{\tau_1, \tau_2\}^T$ 이고 H, C, K 는 각각 관성, 감쇠, 강성에 해당하는 2×2 크기의 정방행렬(square matrix)이다. 위 대상계는 제어입력 τ 와 직접 연관된 하부계(subsystem)인 강체 모우드 회전운동계와, 직접 연관되어 있지 않고 연성된 동역학 항에 의해 간접적으로 구동되는 하부계인 진동계로 구분되어진다. 이후 회전운동계 등을 제어입력관련 하부계, 진동계와 같은 하부계를 기본적인 슬라이딩 모우드 구성상 일대일 대응의 제어입출력 관계로 설계되는 제어입력에 대하여 추가적인 제

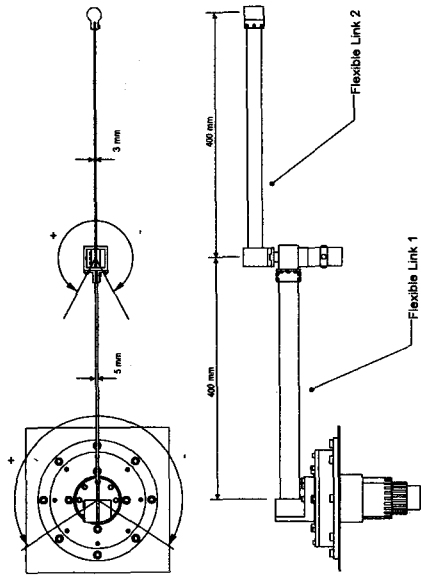


Fig.1 Experimental Set Up of 2 Flexible Link Robot Manipulator

어부하로서 작용한다는 관점에서 부가 하부계(added subsystem)라고 언급하기로 한다.

슬라이딩 모우드 제어기 설계용 모델로서 다시 표현된 대상계는 식(15), (16)과 같이 간단히 표현할 수 있다. 이러한 시스템에 대한 제어기 설계 문제는 제어대상변수에 비하여 소수인 제어입력 u 로서 서로 다른 부분계의 제어대상변수 θ 와 a 를 동시에 제어 가능토록 하는 설계의 문제이다.

그러므로 본 연구에서는 진동제어시에 제어입력 관련된 강체 모우드 회전운동계 뿐 아니라 유연한 링크의 진동계의 동역학을 모두 고려하여 보상할 수 있는 제어를 목적으로 하며, 이에 슬라이딩 모우드 제어의 구조를 사용하고, 소수 제어입력으로 다수 제어대상변수를 동시에 제어할 수 있도록 최적 설계기법에 의한 다중 변수 구조의 슬라이딩 모우드를 설계한다. 이를 이용한 유연한 로봇 조작기의 진동제어를 설계, 실시함으로써, 궁극적으로 유연한 로봇 조작기를 포함하는 제어입출력 구조의 계의 전체 동역학을 반영, 보상할 수 있는 일반적인 비선형 제어 방안을 제안한다.

2. 다중 제어변수로 구성된 주파수 성형 최적 슬라이딩 모우드

슬라이딩 모드 제어 및 시스템 궤적오차들로 구성된 스칼라(scalar)량 s 의 형식을 이용하여 설계되는 비선형 제어들에서는 일대일 대응의 제어입출력 구조가 기본이다. 이에 반하여 유연한 로봇 조작기 계열의 제어입출력 구조계에 대해서는 변형된 형태의 슬라이딩 모드 제어구조가 요구된다.

그러므로 본 연구에서는 최적 슬라이딩 모드 설계기법을 응용하여 다수의 제어변수로 구성되는 슬라이딩 면을 구성, 다수의 제어대상변수와 하나의 제어입력 각각을 일치시킨다. 그러므로써 제어대상변수 각각의 동역학을 모두 반영할 수 있는 구조를 구축한다. 또한 유연한 링크의 진동계의 모델링 및 제어기 설계시 고려되지 않은 고차 모드 진동을 가진하지 않도록 주파수 성형기법[3]을 도입하여 다중 제어변수에 대한 주파수 성형 최적 슬라이딩 모드(multi-variable structured frequency shaped-optimal sliding mode)설계 기법을 연구, 제시한다.

2.1 다중 제어변수로 구성된

주파수 성형 최적 슬라이딩 모드 설계

슬라이딩 모드 설계시 고려할 시스템 궤적 추종오차의 동역학을 각 부분계의 제어목적에 맞추어 설정한다. 2차계로 모델링된 강체모드 회전운동계는 위치제적 추종이 주이므로 궤적 추종 오차는 위치오차의 시간적분항 $\int \tilde{\theta} dt$ 의 (2+1)차로 선정한다. 진동계의 제어는 빠른 진동의 감소, 즉 진동의 속도항이 0으로 되도록 하는 주 목적이다. 그러므로 진동오차는 $\dot{\tilde{q}}$ 의 2차계로 설정한다. 두 제어대상변수에 해당하는 오차 동역학은

$$\ddot{\tilde{\theta}} + a_0 \dot{\tilde{\theta}} + a_1 \tilde{\theta} + a_2 \int \tilde{\theta} dt = u \quad (2)$$

$$\ddot{\tilde{q}} + d_0 \dot{\tilde{q}} + d_1 \tilde{q} = \Omega \quad (3)$$

으로 설정하며, 이때 a_i, d_i 는 각각 오차 동역학의 계수행렬이며 2×2 의 대각행렬로 한다. '~'는 각 시스템 궤적들과 추종하여야 할 궤적간의 추종오차를 나타낸다. 이렇게 설정하는 오차 동역학식은 대상계의 지배방정식과 별개로 설정될 수 있으며 그 자체는 슬라이딩 면의 구조형식, 제어대상변수의 고려차수, 또는 제어기의 형식이라는 면에서 해석되어질 수 있다.

설정한 오차 동역학식을 상태공간 방정식의 형식으로 변환한다. 다음, 전체 시스템 상태변수를

제어입력에 직접 관련변수중 최고차 항, 또는 상용 오차동역학 차수 (3-1)차항인 $x_2 = \{ \tilde{\theta} \}$ 를 설정하고 나머지 상태변수들을 구분하여 상태공간 방정식을 재정리한다. 이때 크기가 표시되지 않은 요소 행렬들은 모두 2×2 정방행렬이다. 추후 x_2 에 대해 주파수 성형 및 LQ최적 관계식을 구한다.

$$\begin{pmatrix} \dot{\tilde{\theta}} \\ \ddot{\tilde{\theta}} \\ \dot{\tilde{q}} \\ \ddot{\tilde{q}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & I & & 0 \\ 0 & 0 & O_{4 \times 4} & I \\ & & O & I \\ -a_2 & -a_1 & O_{2 \times 4} & -a_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \int \tilde{\theta} dt \\ \tilde{\theta} \\ \tilde{q} \\ \dot{\tilde{q}} \end{pmatrix} \quad (4)$$

다음은 제어목적에 따라 다수의 제어대상변수의 관계가 최적화된 슬라이딩 모드 설계를 위하여 최적설계(LQ optimal regulator design)방법을 사용한다. 앞서 정의된 각 제어대상변수의 시스템 궤적오차간의 2차(quadratic) 항으로 구성된 다음의 평가지수(cost function)를 도입한다.

$$J = \int_{t_s}^{\infty} [x_1^T Q_{11} x_1 + 2x_1^T Q_{12}^t x_2 + x_2^T Q_{22} x_2] dt \quad (5)$$

여기서 Q_{11}, Q_{12}^t, Q_{22} 는 상수 가중치 행렬(weighting matrix)이며 $Q_{11} \geq 0, Q_{12}^t > 0, Q_{22} > 0$ 이다. 그리고 t_s 는 슬라이딩 모드가 시작되는 시간을 나타낸다. 최적 슬라이딩 모드의 설계는 이 평가지수로부터 구해지는 리카티 방정식(Riccati equation)을 풀어서 평가지수를 최소로 하는, 즉 시스템 궤적오차들을 최소로 하는 최적화된 상태변수간의 관계를 제어입력관련 상태변수 x_2 에 대해 구해내며 이를 슬라이딩 모드 동역학으로 적용하는 것이다.

이에 제어시에 고려되지 않은 고차 동역학을 야기하지 않도록 하기 위한 주파수 성형과정을 도입하여 특정 주파수 대역에서 가중치가 변화하는 평가지수를 설계한다[3]. 주파수 성형 가중치 행렬 \bar{Q}_{22} 와 상태변수 \bar{x}_2 의 관계식, 즉 주파수 성형 보상기의 관계식을

$$\bar{x}_2 = \bar{Q}_{22}^{-1} \cdot x_2 \quad (6)$$

라고 설정하고 이 때 평가지수의 각 가중치들은 $Q_{22}(\omega) = \bar{Q}_{22}^{-1}(\omega) \cdot \bar{Q}_{22}(\omega), Q_{12}^t(\omega) = Q_{12} \cdot \bar{Q}_{22}^{-1}(\omega)$ 이 된다. 여기서 Q_{12} 는 상수 가중치 행렬

이다. 주파수 성형 보상기의 관계식 (6)은 다음과 같이 추가적인 상태공간 변수 \underline{z} 를 도입함으로써 상태공간 방정식으로 전환할 수 있다.

$$\overline{Q}_{22}(\rho) = D + E(\rho I - F)^{-1}G \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \dot{\underline{z}} &= F\underline{z} + G\hat{\underline{\theta}} \\ \hat{\underline{\theta}} &= E\underline{z} + D\hat{\underline{\theta}} \end{aligned} \quad (8)$$

이러한 추가적인 상태공간 변수와 보상기 방정식을 기존의 오차 동역학의 상태공간 방정식과 평가지수에 덧붙임으로써 원하는 시간역에서 표현된 주파수 성형 평가지수를 구한다.

$$\begin{aligned} J &= \int_{t_0}^{\infty} [\underline{x}_1^T Q_{11} \underline{x}_1 + 2\underline{x}_1^T Q_{12} \underline{x}_2 + \underline{x}_2^T Q_{22} \underline{x}_2] dt \quad (9) \\ &= \int_{t_0}^{\infty} [\underline{x}_e^T Q_e \underline{x}_e + 2\underline{x}_e^T N_e \underline{x}_2 + \underline{x}_2^T R_e \underline{x}_2] dt \end{aligned}$$

$$Q_e = \begin{bmatrix} E^T E & O \\ 2Q_{12}E & Q_{11} \end{bmatrix} N_e = \begin{bmatrix} E^T D \\ Q_{12}D \end{bmatrix} R_e = D^T D$$

이다. 이때 $\underline{x}_e = \{\underline{z} \ x_1\}^T$ 이다. 리카티 방정식을 풀어 주어진 평가지수의 LQ 최적해를 제어입력 관련 상태변수 \underline{x}_2 에 대하여 구하면

$$\underline{x}_2 = -(K_e + R_e^{-1}N_e^T) \underline{x}_e, \quad K_e = R_e^{-1}B_e^T P_e \quad (10)$$

여기서 P_e 는 리카티 방정식의 해이며, 이식은 보상기의 동역학과 함께 다음과 같이

$$\begin{aligned} \dot{\underline{z}} &= F\underline{z} + G\underline{x}_2 \quad (11) \\ \underline{x}_2 + R_e^{-1}(B_e^T P_e + N_e^T) \underline{x}_e &= \underline{0} \end{aligned}$$

제어계의 슬라이딩 모우드 동역학을 나타낸다. 이는 LQ 최적설계의 목적인, 시스템 궤적의 오차들을 최소화하며 모델링 불확실성에 대한 주파수 대역 특성을 갖는 제어변수간의 최적관계를 규정하는 것이며 다음과 같은 슬라이딩 모우드 시의 절환면(switching surface)으로 표현할 수 있다.

$$s(\underline{x}_1, \underline{x}_2, \underline{z}) = \hat{\underline{\theta}} + R_e^{-1}(B_e^T P_e + N_e^T) \underline{x}_e \quad (12)$$

또는 각 결과를 대입하여 전개하면,

$$\begin{aligned} s &= (\hat{\underline{\theta}} - \hat{\underline{\theta}}_d) \\ &+ (C_{s_0} \hat{\underline{\theta}} + C_{s_1} \int \hat{\underline{\theta}} dt + C_{s_2} \underline{z} + C_{s_3} \underline{z}) \quad (13) \\ &+ \Omega \{(\hat{\underline{a}} - \hat{\underline{a}}_d) + C_{s_4} \hat{\underline{a}}_1\} \\ &= \hat{\underline{\theta}} - \hat{\underline{\theta}}_r + \Omega(\hat{\underline{a}} - \hat{\underline{a}}_r) \end{aligned}$$

이다. 이 때, Ω 및 C_{s_i} 는 모두 2x2의 대각행렬이다. 여기서 아래첨자 r 은 시스템 기준궤적(reference trajectory)을 나타낸다.

이로써 유연한 로봇 조작기와 같은 제어입출력 구조 계에 있어서 각각 하나 이상의 제어대상변수로 구성되며 제어변수간 시스템 궤적오차 최소화

화 관계와 모델링 불확실성에 대한 주파수 대역 특성을 갖는 슬라이딩 모우드를 설계하였고, 이 슬라이딩 모우드를 통하여 각 다수 제어변수의 조합을 각기 하나씩의 제어입력에 대응, 설계 가능한 구조를 구성하였다.

3. 유연한 로봇 조작기의 슬라이딩 모우드 진동제어

설계된 다수 변수로 구성된 최적 슬라이딩 모우드를 이용하여 유연한 로봇 조작기의 회전운동 궤적 추적제어와 각 유연한 링크의 진동제어기 설계를 수행한다. 식 (1)을 다시 정리하면

$$\begin{aligned} H_{\theta\theta} \ddot{\underline{\theta}} + C_{\theta\theta} \dot{\underline{\theta}} + H_{\theta a} \ddot{\underline{a}} + C_{\theta a} \dot{\underline{a}} &= \underline{\tau} \quad (14) \\ H_{a\theta} \ddot{\underline{\theta}} + C_{a\theta} \dot{\underline{\theta}} + K_{aa} \underline{a} &= -(H_{a\theta} \ddot{\underline{\theta}} + C_{a\theta} \dot{\underline{\theta}}) \end{aligned}$$

이로써 식(14)의 아래식의 우변은 진동계에 대한 구동력 항(driving force term)으로 해석된다. 일반적으로 연성항에 의한 구동력은 설계 불가능한 기존의 동역학 구조로서 진동제어기 설계시 취급하지 않는다. 그러므로 본 제어기 설계시에도 진동의 자유모드 동역학식만을 직접 고려하고 연성된 구동력 항은 주파수 성형 평가지수의 가중치 설계시 반영한다. 또한 강제모드 회전운동계 내의 진동계의 연성항, 특히 실제 제어시에 다루기 어려운 상태변수로서 가속도항은 제한된 최적 슬라이딩 모우드 제어기 구조의 특성에 의해서 부가 하부계의 동역학에 관련지어 다루어질 수 있다. 그러므로 제어기 설계시 고려할 대상계의 동역학 모델은 다음과 같이 설정한다.

$$\begin{aligned} \ddot{\underline{\theta}} &= -B_1(C_{\theta\theta} \dot{\underline{\theta}} + C_{\theta a} \dot{\underline{a}}) - B_1 H_{\theta\theta} \ddot{\underline{a}} + B_1 \underline{\tau} \\ &= f_1^\theta(\underline{\theta}, \underline{a}) - B_1 H_{\theta a} \ddot{\underline{a}} + B_1 \underline{u} \\ &= f_1(\underline{\theta}, \underline{a}) + B_1 \underline{u} \quad (15) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \ddot{\underline{a}} &= -B_2(C_{a\theta} \dot{\underline{\theta}} + K_{aa} \underline{a}) \\ &= f_2(\underline{\theta}, \underline{a}) \quad (16) \end{aligned}$$

여기서 f_1, f_2 는 완전히 알 수는 없으나 그의 불확실성이 $\underline{\theta}, \underline{a}$ 의 연속적인 함수 꼴에 의하여 제한되는 비선형 함수이다. 또한 입력행렬 $B_1 = H_{\theta\theta}^{-1}, B_2 = H_{aa}^{-1}$ 의 각 요소 또한 제한된 불확실성을 갖는 함수이다. B_1 는 다 입력계로서의 가제어성 조건의 만족이 요구된다[4].

제어시 발생하는 시스템 궤적의 추종오차를 앞서 설계한 다수 변수로 구성된 최적 슬라이딩 면의 정의, 식 (13)를 이용하여 표시한다. 슬라이딩 면 벡터는 $s \in R^2$ 로 제어입력 \underline{u} 의 개수와 같

고 각 요소는 각 링크의 2 제어변수, 회전운동과 진동을 최적 설계된 관계로 개별 제어입력에 연결한다. 이 슬라이딩 모드에 기준하여 슬라이딩 모드 상의 제어입력인, 공칭 시스템 함수와 제어이득으로 구성된 등가제어기(equivalent controller)를 설정한 뒤,

$$\begin{aligned}\hat{\underline{u}} &= -\hat{\underline{f}}_1 + \hat{\underline{g}}_r + \Omega(-\hat{\underline{f}}_2 + \hat{\underline{a}}_r) \\ &= -\hat{\underline{f}}_1^0 + \hat{\underline{g}}_r - (\Omega - \hat{B}_1 \hat{H}_{0q}) \hat{\underline{f}}_2 + \Omega \hat{\underline{a}}_r\end{aligned}\quad (17)$$

추정된 시스템 함수 및 제어이득이 정확하다고 가정할 때의 절환 제어기(switching controller)를 슬라이딩 모드 동역학으로부터 구한다.

$$\underline{u} = \hat{B}_1^{-1}(\hat{\underline{u}} - k \operatorname{sgn}(s))\quad (18)$$

여기서 $\operatorname{sgn}(s)$ 는 s 의 부호를 나타내는 함수이다. 이 때 \hat{A} 는 시스템 함수요소 A 의 추정치(estimation)을 나타낸다. 이렇게 정의된 제어기들을 슬라이딩 모드 조건식에 대입하여 시스템 물성치의 불확실성의 존재하에서 절환이득(switching gain) k 를 결정한다.

이렇게 구성된 제어계가 Lyapunov 함수 (19)에 의한 슬라이딩 모드 조건을 만족하도록 하는 절환이득 k 를 구한다.

$$V = \frac{1}{2} s^T s > 0, \quad \dot{V} = s^T \dot{s} \leq -\eta\quad (19)$$

Lyapunov 안정성 조건에 의하여 절환이득 k 는 다음과 같이 결정되어진다.

$$\begin{aligned}(I+D)k &= \mathbf{E}_1^0 + \Omega \mathbf{E}_2 + (I+D)\hat{B}_1 \mathbf{H} \mathbf{E}_2 \\ &\quad + D\{|-\hat{\underline{f}}_1^0 + \hat{\underline{g}}_r| + \Omega|-\hat{\underline{f}}_2 + \hat{\underline{a}}_r|\} + \eta\end{aligned}\quad (20)$$

Frobenius-Perron Theorem에 의하면 위와 같은 형태의 방정식으로부터 음이 아니며 유일한 해로서 절환이득 k 를 구할 수 있다[4].

여기서 D 는 입력행렬 B_1 의 추정오차의 한계 D_{ij} 를 요소로 갖는 2×2 정방행렬이다.

$$B_1 = (I+D) \hat{B}_1, \quad |D_{ij}| \leq D_{ij} \quad (i, j=1,2)\quad (21)$$

또한 각 시스템 함수의 추정치 오차의 한계는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\mathbf{E}_1^0 &\geq |f_1^0 - \hat{f}_1^0|, \quad \mathbf{E}_2 \geq |f_2 - \hat{f}_2| \\ \mathbf{H} \mathbf{E}_2 &\geq |H_{0q} f_2 - \hat{H}_{0q} \hat{f}_2|\end{aligned}\quad (22)$$

이로써 다수 입력을 갖는 유연한 로봇 조작기의 슬라이딩 모드 진동제어기 설계를 논했다. 안정되도록 설계된 절환제어기는 시스템 궤적들을 슬라이딩 모드로 도달시키며, 도달된 대상계는 슬라이딩 모드에서 유지됨을 Lyapunov 함

수 변화율이 음의 반한정(semi-negative definite)인 조건에서 보이고 있다. 또한 슬라이딩 모드에서 유지되는 제어계는 2장에서 설계된 바와 같이 시스템 궤적 오차들로 구성된 평가지수를 최소화 하기 위한 최적화 된 관계 또는 동역학으로 거동하며, 따라서 시스템 궤적 추종오차는 점근적으로 0이 됨을 알 수 있다[5].

4. 슬라이딩 모드 진동제어실험

실험에 사용된 2자유도 유연한 로봇 조작기의 진동제어기는 모델링된 보다 세부적인 비선형 동역학을 직접 대입하여 직접 유도, 설계하였다. 또한 다 입력계의 시변 경계층을 설계하여 포화함수로 구성된 슬라이딩 모드에 적용하였다.

유연한 로봇 조작기 계열의 제어입출력 구조계에 대하여 제안된 주파수 성형 최적 슬라이딩 모드 설계에 있어서의 설계변수로서는 우선 주파수 성형 가중치 행렬 \bar{Q}_{22} 은 고주파 통과 필터(high pass filter)로서 설계되어진다. 그리고 상수 가중치 행렬 Q_{11} 은 x_1 으로 표현된 각 제어변수의 2차 오차항의 비중을 설계할 수 있으며, Q_{12} 는 제어기 설계시 도입된 모델에서 생략한 구동력 항의 형식에 근거하여 두 하위계 간의 연성비중을 설계한다.

설계된 슬라이딩 모드 제어기를 모의실험 대상계 및 실제 실험장치에 실장하였다. 비교 실험으로는 유연한 링크의 진동거동은 고려하지 않고 주어진 회전궤적에 대하여 강체 모드 회전운동 궤적 추적제어만을 실시하는 경우와 진동제어를 동시에 실시하는 경우에 대하여 모의실험과 실험을 수행하여 그 결과를 비교 분석하였다. 실험의 결과들을 그림 2,3에 나타내었다.

전반적인 제어의 결과만을 살펴보면 회전운동 궤적 추적제어와 진동제어를 동시에 수행하였을 때, 진동이 빠르게 감쇠하여 유연한 링크의 끝단의 위치 정밀도가 향상됨을 알 수 있다. 즉 목표 시간 후반부에 진동이 억제될 뿐만 아니라 회전 각 오차 또한 회전운동 제어만을 실시한 경우의 오차와 같은 수준이 되어, 결과적으로 마치 강체 링크의 회전시와 같은 끝단 위치 정밀도를 보장할 수 있음을 보인다. 이는 유연한 로봇 조작기의 진동제어의 목적에 부합하며 진동제어의 특성을 그대로 나타낸다.

또한 본 연구의 방향에 준하여 살펴보면 우선 제안된 제어계의 목적에 맞추어 하나의 제어입력으로 다수의 제어변수를 동시에 제어 가능함을 보였다. 제안된 제어기의 특성에 따라 실제 실험 대상계에서도 제어기 설계시 고려되지 않은 2차 진동 모우드가 가진되지 않음을 볼 수 있다. 그리고 다양한 추종궤적에 대하여 일반적으로 안정적인 제어가 이루어짐을 보임으로서 본 연구에서 제안한 유연한 로봇 조작기와 같은 제어입출력 구조 계에 대한 주파수 성형 최적 슬라이딩 모우드 제어이론의 타당성을 실험적으로 증명하였다.

5. 결론

2개의 유연한 링크로 구성된 로봇 조작기의 진동제어를 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

구동 관절부의 제어입력으로써 회전운동 및 유연한 링크의 진동을 동시에 제어하여야 하는 제어입출력 구조특성을 나타내는 유연한 로봇 조작기에 대한 비선형 제어기로서 다수의 제어대상 변수로 구성되는 주파수 성형 최적 슬라이딩 모우드를 설계하고 제어기를 구성하였다. 제어입력 관련성에 의해 구분되는 각 하부계의 동역학을 모두 반영하여 각 하부계의 제어변수를 동시에 제어하는 성능을 실험적으로 검증하였다. 유연한 2링크 로봇 조작기의 진동제어실험을 통하여 제안된 소수 입력에 의한 다수 출력 동시 제어계의 최적 슬라이딩 모우드 제어의 타당성 및 제어성능을 확인하였다.

참고문헌

- (1) W. J. Book, O. Maizza-Neto, D. E. Whitney (1975), Feedback Control of Two Beam, Two Joint Systems with Distributed Flexibility, Transaction of ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, pp.424-431.
- (2) P.J. Nahtan, S.N. Singh (1991), Sliding Mode Control and Elastic Mode Stabilization of Robotic Arm with Flexible Links, J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control, vol. 113, pp.669-676
- (3) K. David Young and Ümit Özgüner (1993), Frequency Shaping Compensator Design for

Sliding Mode, Int. J. Control, Vol. 57, No. 5, pp. 1005-1019.

- (4) Jean-Jacques E. Slotine, Weiping Li (1991), Applied Nonlinear Control, (Prentice-Hall)
- (5) Hassan Khalil(1996), Nonlinear System, Prentice-Hall

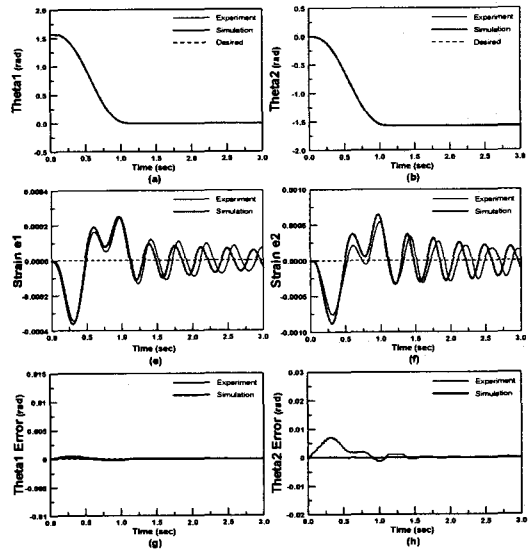


Fig.2 Position Control Only for 90° , 1.15sec

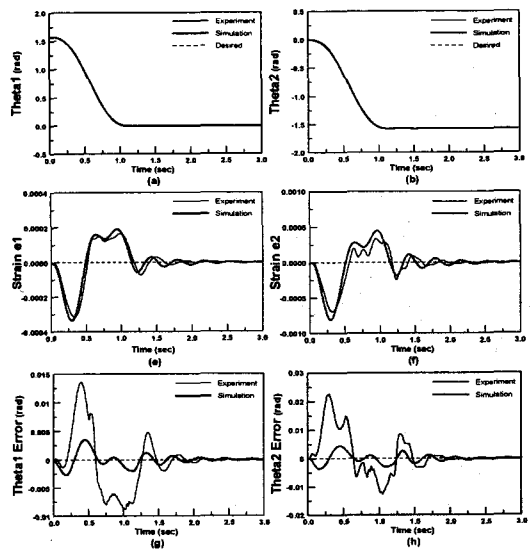


Fig.3 Vibration Control for 90° , 1.15sec