

유연한 로봇팔의 선단 위치 제어를 위한 강인한 제어기의 설계

Robust Controller Design for Flexible Robot Arm Manipulator

신봉철, 이형기, 최연욱, 안영주

Bong-Chul Shin, Hyung-Gi Lee, Yeon-Wook Choe, Young-Joo An

요 약

본 연구는 유연한 로봇팔의 선단 위치를 제어하기 위한 강인한 제어기의 설계를 하고 이것의 효과를 실험을 통하여 확인하는 데 있다. 이를 위해 먼저 유연한 로봇팔의 모델링을 Lagrange 방정식을 이용하여 수행하여 시스템의 수식모델을 구한 뒤, 이 모델을 기본으로 하는 강인한 제어기의 설계를 LMI(Linear Matrix Inequality)을 적용한 H_∞ 이론을 도입하여 수행한다. 이 과정에서 로봇팔의 선단부하 변경으로 인한 시스템 파라미터의 변동을 플랜트가 가지는 불확실성 영역으로 간주하여 이를 설계에 적극적으로 반영함으로써 결과적으로 플랜트의 파라미터 변동에 강인한 제어를 구현하고 이것의 유효성을 실험을 통하여 확인한다.

Abstract

The objective of this paper is to design a robust controller for a flexible robot arm manipulator using LMI(Linear Matrix Inequality) theory, and confirm its effectiveness through experimentation. We first describe a modeling process of the flexible arm in order to get a mathematical model, and then discuss how to approximately obtain the uncertainty of the model for robust control. As to the control system design, we adopt the LMI-based H_∞ synthesis algorithm which has the merits of eliminating the regularity restrictions attached to the Riccati-based methods. As a result of this, we can cope with the parameter variation (that is, modeling uncertainty) due to the tip-load variation. Finally we confirm the effectiveness of the controller through experiment and simulation.

Key words : flexible manipulator, robust control, H_∞ control

I. 서 론

최근 로봇은 가공, 운반, 용접, 조립, 포장, 검사 및 산업현장의 자동화 부분에 널리 사용되어 제품 생산의 원가 절감, 품질, 생산성 및 정밀도의 향상에 크게 기여하고 있다. 특히 인간의 작업영역을 벗어난 원자력에 관련된 위험지역이나 해양, 항공, 우주, 여러 분야의 극한 환경 등에서 강체 로봇이 많이 응용되고 있다. 그러나 이들 강체 로봇은 크기와 무게로 인하여 넓은 공간을 필요로 하고 동작속도가 느리며, 구동장치가 크고 운동에너지가 많이 소모되는 등의 단점을 가지고 있다. 이러한 단점을 보완하기 위한 경량화 된 유연한 로봇팔에 관한 연구가 요구되고, 이를 속응성 있게 제어하기 위하여 동역학을 기초로 한 시스템의 모델링과 진동을 효율적으로 제어하기 위한 제어 알고리즘이 필요하게 된다.[1][2][3]

본 논문에서는 강인한 제어기의 설계기법으로 LMI 이론에 기초한 H_∞ 제어법을 적용한다. 잘 알려진 바와 같이 일반적인 Riccati 방정식을 이용한 H_∞ 제어법을 적용하기 위해서는 플랜트의 극점과 영점에 관하여 많은 제약조건을 요구하고 있다. 이에 반해 LMI 이론을 이용하면 계산상 좀 더 많은 노력이 필요하지만, 주어진 플랜트에 대해서는 아무런 제약조건을 필요로 하지 않는다는 장점을 가지고 있다.

본 연구의 제어대상인 유연한 로봇팔은 특성상 원점 부근에서 극점과 영점을 가지는 경우가 많기 때문에 Riccati 방정식을 이용하여 H_∞ 제어법을 적용하기 위한 제약조건을 만족시키기 쉽지가 않다. 따라서 본 연구에서는 LMI 이론을 적용한 방법을 채용하여 제어기를 설계하고 이를 실험을 통하여 확인한다.

제어시스템의 구성은 제어대상이 되는 유연한 로봇팔

의 상태공간 모델과 토크를 입력으로 하여 선단 변형을 출력으로 하는 전달함수를 유도하고, 이를 제어할 수 있는 H_∞ 제어시스템으로 구성한다.

II. 제어대상의 상태공간 모델링

이 장에서는 제어대상인 유연한 로봇팔의 수학적 모델을 구한다. 그림 1은 구하고자 하는 유연한 로봇팔의 좌표계를 나타낸 것이다. 유연한 로봇팔의 한쪽 끝은 전동기의 회전축에 고정되어 있고, 다른 한쪽 끝은 자유로운 상태로 구성된 고정-자유단(clamped free) 구조의 상태공간 방정식을 유도한다.

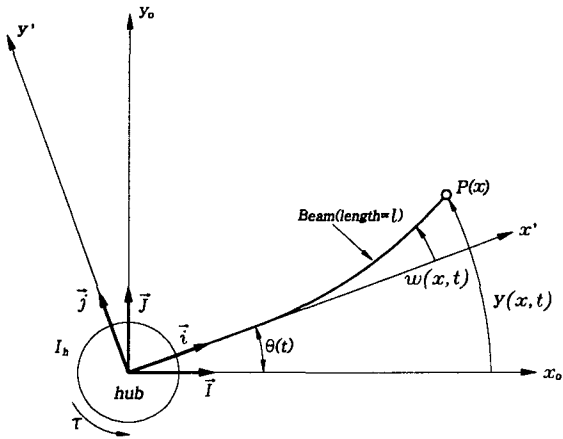


그림 1. 유연한 로봇팔의 좌표.

Fig. 1. The coordinate of a flexible robot manipulator.

그림 1에서 로봇팔의 수직 높이는 폭보다 훨씬 크므로 빔의 진동은 팔의 진동은 수평방향으로만 진동하는 것으로 가정한다. 빔의 전단변형과 회전관성 효과에서 적은 값들은 무시하였으며, 액추에이터와 로봇팔의 고정부를 합한 허브의 관성모멘트는 I_h , 길이는 l , 전동기의 회전각은 $\theta(t)$, 입력토크는 τ 이다. \vec{i} 와 \vec{j} 는 고정된 좌표계 x_0 축과 y_0 축 방향의 단위벡터이며, \vec{i}' 와 \vec{j}' 는 회전 좌표계 x' 축과 y' 축 방향의 단위벡터이며, $P(x)$ 는 거리 x 지점의 위치벡터이다. $w(x, t)$ 는 거리 x 에서 탄성변형, $y(x, t)$ 는 제어시스템의 출력이며 유연한 로봇팔의 선단 위치이다.

그림 1에서 전동기가 x_0 축에서 x' 축으로 $\theta(t)$ 각도만큼 회전할 경우 유연한 로봇팔은 진동 즉, $w(x, t)$ 의 탄성변형이 발생하게 된다. 이러한 경우 x 지점에서의 탄성변형 $w(x, t)$ 는 가정-모드방법을 이용하면

$$w(x, t) = \sum_{i=1}^n \phi_i(x) q_i(t) \quad (1)$$

로 되며, 여기서 $\phi_i(x)$ 는 로봇팔의 i 번째 모드의 휨의 정도를 나타내는 고정-자유단 구조에서의 고유함수로서 다음 식으로 주어진다.

$$\phi_i(x) = c_i (\sin \beta_i x - \sinh \beta_i x) - \sigma_i \cdot (\cos \beta_i x - \cosh \beta_i x) \quad (2)$$

$$\sigma_i = \frac{(\sin \beta_i l - \sinh \beta_i l)}{(\cos \beta_i l + \cosh \beta_i l)} \quad (3)$$

여기서 β_i 는 식(4)에 대한 해이며, c_i 는 일정한 값을 갖는 임의의 상수이다.

$$1 + \cos \beta l \cdot \cosh \beta l = 0 \quad (4)$$

또한 고정-자유단 구조에서 고유함수의 공진주파수 ω_i 는 다음과 같이 나타낸다.[1]

$$\omega_i = \beta_i^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho}} \quad (5)$$

여기서 E 는 유연한 로봇팔의 굽힘강성, I 는 로봇팔의 단면에 대한 관성모멘트, ρ 는 밀도이다.

상태공간 모델을 유도하기 위하여 유연한 로봇팔에 인가되는 토크 τ 를 입력으로 하고 유연한 로봇팔의 선단 위치를 출력으로 설정하면, 유연한 로봇팔의 선단 위치 출력은 탄성변형 $w(l, t)$ 와 강체변형(rigid body deflection) $\theta(t) \cdot l$ 의 합으로서 다음 식(6)과 같다.[1]

$$y(l, t) = w(l, t) + \theta(t) \cdot l \quad (6)$$

위 식을 근거로 유연한 로봇팔의 운동에너지 U 와 위치에너지 V 를 구하고, Lagrangian 에너지 함수 $L = U - V$ 와 식(7)과 (8)의 Euler-Lagrange 방정식을 이용하여 유연한 로봇팔의 운동방정식을 구하면 식(9)와 (10)으로 유연한 로봇팔의 미분방정식이 유도된다.

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} = 0, \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (7)$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} - \frac{\partial L}{\partial \theta} = \tau \quad (8)$$

$$\ddot{\theta} = \frac{\tau + \sum_{i=1}^n q_i \omega_i^2 a_i}{I_h} \quad (9)$$

$$\ddot{q}_i = -\frac{a_i}{I_h} \tau - q_i \omega_i^2 \cdot \left[1 + \frac{a_i^2}{I_h} \right] \quad (10)$$

$$a_i = \int_0^l \phi_i(x) dx \quad (11)$$

$$\tau = G_a \cdot K_t \cdot v \quad (12)$$

식(12)에서 G_a 는 서보증폭기의 이득, K_t 는 전동기 토크 상수, v 는 서보증폭기 입력신호전압이다.

유연한 로봇팔의 상태공간 방정식과 출력방정식은 식(9)와 (10)을 이용하면 다음 식으로 유도된다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\theta} \\ \dot{q}_1 \\ \dot{q}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & K_1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \theta \\ q_1 \\ q_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_2 \\ 0 \\ K_4 \\ 0 \end{bmatrix} v \quad (13)$$

$$y = [0 \ 1 \ 0 \ \phi] \begin{bmatrix} \theta \\ \theta \\ q_1 \\ q_1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

여기서

$$K_1 = \frac{\omega_i^2 a_i}{I_h}, \quad K_2 = G_a \frac{K_t}{I_h}$$

$$K_3 = -\omega_i^2 \left[1 + \frac{a_i^2}{I_h} \right], \quad K_4 = -\frac{G_a K_t}{I_h} \cdot a_i$$

이다.

III. LMI를 이용한 H_∞ 제어기의 설계법

여기서는 H_∞ 제어기를 설계하기 위한 기법의 하나인 LMI를 이용한 방법을 간단히 요약하고, 본 연구와의 관련성에 대하여 언급한다.

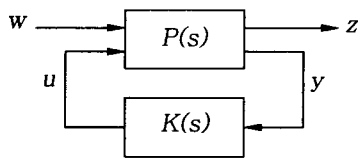


그림 2. H_∞ 제어용 2-입력 구조

Fig. 2. Two-port structure for H_∞ control.

먼저 그림 2와 같이 주어진 폐환시스템에서 제어기 K 의 설계목적은 1) 폐루프시스템이 내부 안정, 2) 폐루프시스템이 다음과 같은 평가조건을 만족시키고자 하는 것이다.

$$\|T(P(s), K(s))\|_\infty < \gamma \quad (15)$$

단,

$$T(P, K) = P_{11} + P_{12}K(I - P_{22}K)^{-1}P_{21} \quad (16)$$

이다. 식(15)를 만족하는 제어기 $K(s)$ 의 설계법에는 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 즉 Riccati 방정식을 이용하는 것과 LMI(Linear Matrix Inequality)를 하는 것이다. 이미 언급한 것처럼 LMI를 이용하면 플랜트에 가해지는

여러 가지의 제약조건을 완화시킬 수 있으며, 또한 (15)식의 형태로 주어지는 제약조건 이외의 조건(예를 들어 H_2 -norm 조건 등)을 동시에 만족하는 제어기를 설계하는 경우에도 유용하다. 여기서는 본 연구에서 사용한 LMI 이론에 기초한 H_∞ 제어기법을 정리의 형태로 간단히 요약한다.[4][5]

먼저 상태공간 표현으로 주어진 일반화 플랜트 $P(s)$

$$P(s) = \begin{bmatrix} P_{11}(s) & P_{12}(s) \\ P_{21}(s) & P_{22}(s) \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \end{bmatrix} (sI - A)^{-1} [B_1 \ B_2] + \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} \\ D_{21} & 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

와 제어기 $K(s)$

$$K(s) = C_K(sI - A_K)^{-1}B_K + D_K \quad (18)$$

를 생각한다. 간략한 표현식을 얻기 위하여 제어기는 플랜트와 동일한 차원을 가지며 엄밀히 프로퍼(strictly proper)하다고 가정하였다. 또한 아래와 같은 직교조건을 부가한다. 여기서 아래 식(19)로 주어지는 직교조건은 어디까지나 정리 1로 주어지는 조건식의 표현을 간략하게 나타내기 위한 것이다. 따라서 직교조건을 만족하지 않는 경우에도 어렵지 않게 제어기의 설계를 수행할 수 있다.

$$D_{11} = 0, \quad D_{12}^T [C_1 \ D_{12}] = [0 \ 0], \quad D_{21} [B_1^T \ D_{21}^T] = [0 \ 0] \quad (19)$$

정리 1 : 식(17)로 주어진 일반화 플랜트에 대하여 아래의 세 가지 조건은 등가이다.

- (i) 페루프시스템을 내부안정으로 하며 동시에 $\|T_{zw}(s)\|_\infty < \gamma$ 로 만드는 식(18)로 주어지는 제어기가 존재한다.
- (ii) 다음의 세 가지 부등식을 만족하는 정정 대칭 행렬 X, Y 가 존재한다.

$$R := AX + XA^T + XC_1^T C_1 X + \frac{1}{\gamma^2} B_1 B_1^T - B_2 B_2^T < 0 \quad (20)$$

$$Q := YA + A^T Y + YB_1 B_1^T Y + \frac{1}{\gamma^2} C_1^T C_1 - C_2^T C_2 < 0 \quad (21)$$

$$\begin{bmatrix} X & \gamma I \\ \gamma I & Y \end{bmatrix} > 0 \quad (22)$$

- (iii) 다음 세 가지의 LMI 조건을 만족하는 정정 대칭 행렬 X, Y 가 존재한다.

$$\begin{bmatrix} AX + XA^T + B_1 B_1^T - B_2 B_2^T & XC_1^T \\ C_1 X & -\gamma I \end{bmatrix} < 0 \quad (23)$$

$$\begin{bmatrix} YA + A^T Y + C_1^T C_1 - C_2^T C_2 & YB_1 \\ B_1^T Y & -\gamma I \end{bmatrix} < 0 \quad (24)$$

$$\begin{bmatrix} X & \gamma I \\ \gamma I & Y \end{bmatrix} > 0 \quad (25)$$

이때 조건 (ii) 혹은 (iii)이 성립할 때, (i)의 조건을 만족하는 제어기의 하나는

$$A_K = A + B_2 C_K - B_K C_2 + Y^{-1} C_1^T C_1 - Y^{-1} Q(\gamma^2 I - XY)^{-1} \quad (26.a)$$

$$B_K = Y^{-1} C_2^T, \quad C_K = B_2^T Y(\gamma^2 I - XY)^{-1} \quad (26.b)$$

로 주어진다. 단 Q 는 식(21)에 주어져 있으며, 조건 (i)의 T_{zw} 는 w 에서 z 사이의 페루프 전달함수를 의미하는 것으로 위 식(16)으로 주어진다.

H_∞ norm 조건을 만족하는 제어기를 설계하기 위한 정리 1의 조건식 (23)~(25)는 LMI로 표현되어 있으므로 시판의 소프트웨어를 이용한다면 비교적 간단하게 해를 구할 수 있다.[6]

IV. 제어기의 설계

유연한 로봇팔의 전달함수를 고찰하기 위하여 II장에서 유도한 상태공간 모델의 상태공간 방정식과 출력 방정식의 각 상태변수에 라플라스 변환을 취하여 유연한 로봇팔의 구성도를 나타내면 그림 3과 같다. 그림 3에서 $V(s)$ 는 전압, $W(s)$ 는 유연한 로봇팔의 탄성변형으로 $Q(s)$ 와 같으며, $\theta(s)$ 는 전동기의 회전각, $Y(s)$ 는 시스템의 출력으로서 유연한 로봇팔의 선단위치이다.

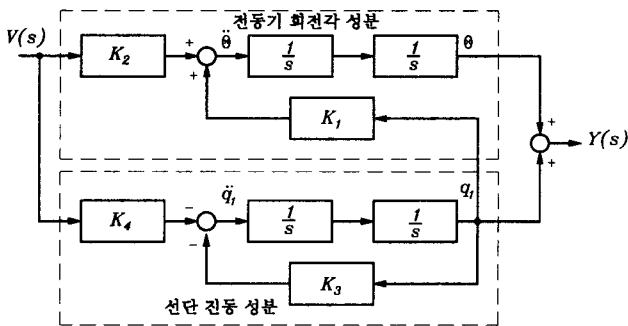


그림 3. 유연한 로봇팔의 블록선도

Fig. 3. The block diagram of flexible robot manipulator.

유연한 로봇팔의 선단위치 $Y(s)$ 에 대한 개루프 전달함수는 식(27)과 같다.

$$G(s) = \frac{Y(s)}{V(s)} = \theta(s) + W(s) = \frac{b_2 s^2 + b_0}{s^4 + a_2 s^2} \quad (27)$$

H_∞ 제어기의 설계과정에서 가장 중요한 역할을 하고 있는 플랜트의 불확실성 영역을 다음과 같이 결정한다. 위에서 유도한 제어대상의 전달함수 식(27)은 표준모델(nominal model)에 대한 전달함수이다. 따라서 로봇팔의 선단 부하 변화에 대한 파라미터의 변동을 플랜트의 불확실성 영역으로 간주하여 이를 설계에 반영한다.

아래 그림 4와 5는 선단부하를 0g, 32g 및 64g 으로 각각 변화시켰을 때의 주파수 특성을 나타내고 있다. 이때 사용된 각 파라미터 값을 표 1에 나타내었다. 각각의 주파수특성을 $\hat{G}_i(s)$ ($i=1\sim3$)로 두고 플랜트의 불확실성 영역을 다음 식(28)과 같이 결정한다.

$$|A_m(s)| = \left| \frac{\hat{G}_i(s) - G(s)}{G(s)} \right|, \quad (i=1\sim3) \quad (28)$$

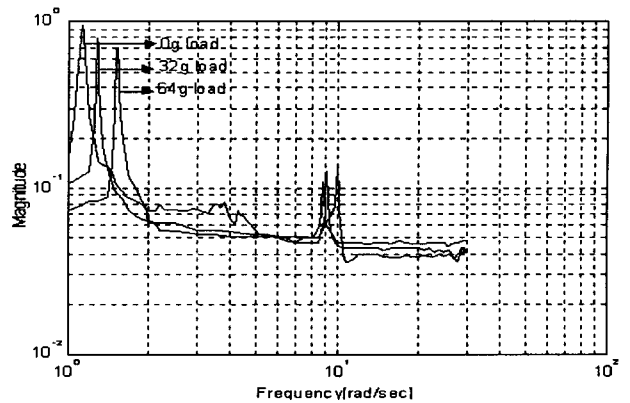


그림 4. 유연한 로봇팔의 주파수 응답(이득)

Fig. 4. Frequency responses of the flexible robot manipulator(gain).

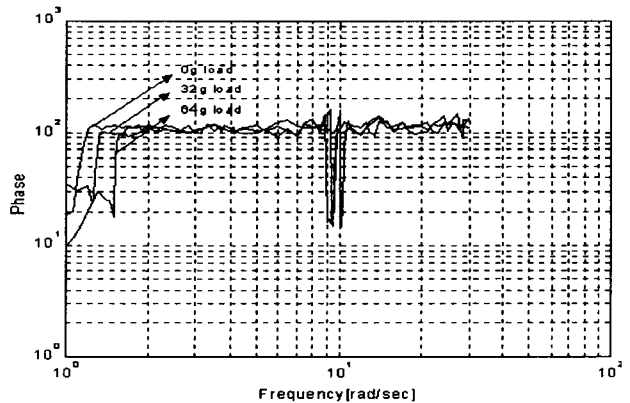


그림 5. 유연한 로봇팔의 주파수 응답(위상)

Fig. 5. Frequency responses of the flexible robot manipulator(phase).

표 1. 시스템에 사용한 파라미터

Table 1. Parameters

Parameter	Value	Unit	Parameter	Value	Unit
빔의 길이	1.2	m	토크상수	0.17	Nm/A
빔의 높이	25.4	mm	전동기관성	0.023	kg · m'
빔의 두께	1.95	mm	증폭기이득	17.66	A/V
빔의 재질	Al				
K_1	250		K_2	103	
K_3	325		K_4	103	

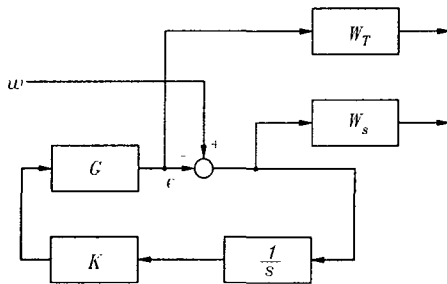


그림 6. H_∞ 제어기를 사용한 위치제어 시스템
Fig. 6. The position control system using H_∞ controller.

그림 6은 H_∞ 제어기를 사용하여 위치제어 시스템을 구성한 블록도이다. 여기서 W_s 는 플랜트 감도를 정의하며, W_T 는 플랜트의 불확실성 영역을 나타내는 것으로 식(28)을 이용하여 다음 식(29)와 같이 정해진다.

$$|\Delta_m(j\omega)| \leq |W_T(j\omega)|, \forall \omega \quad (29)$$

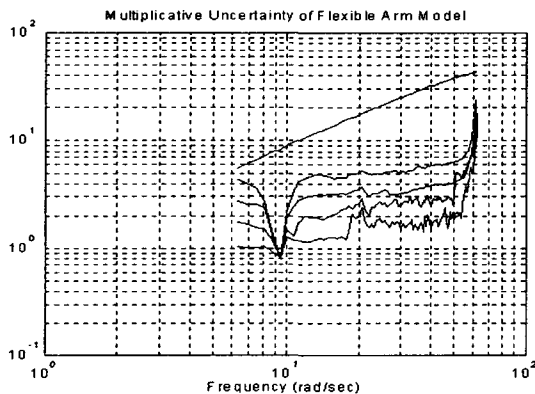


그림 7. 곱셈형 가중함수 모델 $W_M(s)$
Fig. 7. Model of uncertainty weight $W_M(s)$.

또한 그림 7은 실험결과를 모두 포함하는 곱셈형 가중함수를 나타낸 것이다. 그림 7의 아래쪽 네 가지 곡선은 식(29)의 왼쪽 항을 실험을 통하여 구한 것이며, 제일 위쪽의 곡선은 식(29)의 우변항, 즉 곱셈형 가중함수를 의

미하고 있다.

V. 시뮬레이션

Matlab을 이용하여 표준모델의 전달함수를 구하면 아래와 같다.

$$G(s) = \frac{721.3s^2 + 118.9s + 1318.3}{s^4 + 160s^3 + 124s^2 + 13750s + 14} \quad (30)$$

그림 7을 이용하여 플랜트의 곱셈형 불확실성 영역을 전달함수 형식으로 나타낸 것이 $W_T(s)$ 이다. 즉

$$W_T = \frac{72.3426s^3 + 239.1144s^2 + 196.7901s + 0.1966}{s^3 + 84.077s^2 + 280.4746s + 220.7288} \quad (31)$$

감도함수는 몇 번의 시행착오를 거쳐 다음과 같이 결정하였다.

$$W_S = \frac{23.9063s + 135.9979}{s^3 + 2.6835s^2 + 2.8911s + 1.3943} \quad (32)$$

이와 같은 가중함수를 이용하여 일반화 플랜트(그림 6)을 작성하고 여기에 정리 1을 적용하면 제어기 $K(s)$ 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$K(s) = \frac{1.408e5s^7 + 3.424e7s^6 + 1.906e9s^5 + 8.28e9s^4 + 1.582e11s^3 + 3.785e11s^2 - 5.992e9s + 7.109e8}{s^8 + 4801s^7 + 4.04e6s^6 + 1.536e9s^5 + 3.279e9s^4 + 6.286e9s^3 + 7.144e8s^2 + 5.669e9s + 2.063e8} \quad (33)$$

식(33)은 실험을 위해서 최대 차수를 Matlab을 이용하여 8차로 줄였다.

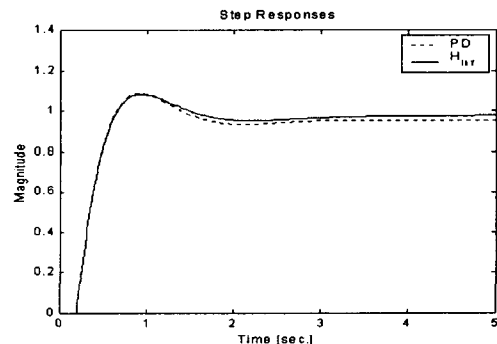


그림 8. 시뮬레이션 결과 : 페루프 시스템의 스텝응답
Fig. 8. Simulation results : Step response of the closed loop system.

식(19), (20)으로 얻어진 유연한 로봇팔의 수식모델에 있어서, 일반적인 PD 제어기와 H_∞ 제어기를 각각 사용

한 시뮬레이션 결과를 그림 8에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 상승시간과 오버슈트는 거의 비슷하게 나타나며, 정상편차에서는 PD 제어기보다 H_{∞} 제어기가 약간 개선된 제어결과를 보이고 있다.

III장의 식(15)에서 지정한 γ 값을 여러 가지로 변경하여 시뮬레이션을 수행한 결과가 그림 9이다. γ 가 작아지면 식(23)~(25)의 LMI가 수렴하지 않는 경우가 발생하고, 또 그림 9에서 보는 바와 같이 과도응답 특성이 나빠지는 것을 알 수 있다. 본 연구에서는 γ 를 8.2로 설정하고 제어기의 설계를 수행하였다. γ 값이 증가하면 당연히 전체 시스템의 강인성이 감소된다. 본 실험에서 이와 같이 γ 의 값이 이렇게 큰 값을 가지게 된 것은 로봇팔 선단에 적용한 부하변동의 범위가 본체(로봇팔)의 무게에 비하여 상당히 큰 것에 기인한 것으로 생각된다.

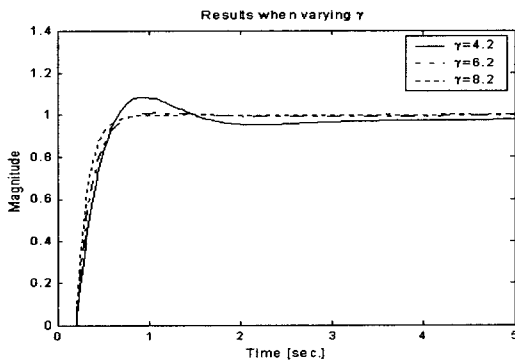


그림 9. γ 를 변화시킬 때의 시뮬레이션 결과

Fig. 9. Simulation results : Results when varying γ .

VI. 실험 및 고찰

LMI를 이용한 H_{∞} 설계기법을 적용하여 구성한 제어기의 성능을 확인하기 위하여 유연한 로봇팔 시스템에 적용하고 제어성능을 확인한다.

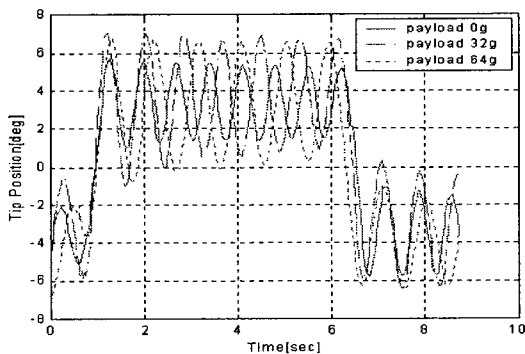


그림 10. PD 제어기를 사용한 시스템의 응답

Fig. 10. Response of the position control system using PD controller.

그림 10과 11은 payload를 각각 0g, 32g 및 64g으로 변화할 때, 기준입력을 $\pm 4[\text{deg}]$ 로 하는 구형파 형태의 입력신호를 플랜트에 인가하였을 경우 PD제어기와 H_{∞} 제어기를 사용한 위치제어 시스템의 응답을 측정하는 것이다.

그림 10은 PD제어기를 적용한 경우 진동특성을 측정하는 것이며, 위치제어 시스템의 진동성분은 정상상태에서 약 $\pm 3[\text{deg}]$ 로 감쇠진동을 하고 있다. 그러나 그림 11에서 보는 바와 같이 H_{∞} 제어기를 적용한 위치제어 시스템의 경우에는 정상상태에서 진동성분은 최대 $\pm 0.25[\text{deg}]$ 가 됨을 보이고 있다. 이 결과로부터 H_{∞} 제어기가 PD제어기보다 오버슈트의 양도 작고, 훨씬 빠르게 지령값에 수렴하는 것을 알 수 있다.

또한 선단 payload가 없는 경우에는 거의 진동이 보이지 않으나, 큰 경우 진동성분이 약간 나타나는데 이는 시스템에 사용한 전동기와 구동 드라이버의 특성에도 관련이 있는 것으로 사료된다.

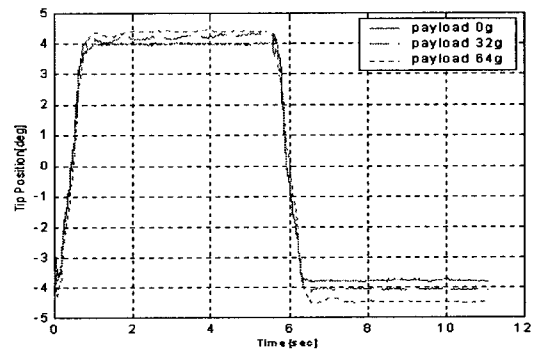


그림 11. H_{∞} 제어기를 사용한 시스템의 응답

Fig. 11. Response of the position control system using H_{∞} controller.

VII. 결론

비선형 시스템인 유연한 로봇팔을 제어하는 경우 시스템의 고유 특성으로 인해 원하지 않는 저주파 진동이 발생하므로 로봇팔의 위치제어와 진동제어를 할 경우 고도의 정확성과 안정성을 필요로 한다. 따라서 본 연구에서는 LMI를 이용한 강인한 제어기의 설계기법을 적용하여 제어대상의 모델링 과정에서 발생한 오차나 파라미터의 변동 등을 모델링 불확실성으로 간주하고, 과도특성과 정상특성 등에 대해 빠르게 대응할 수 있는 강인한 제어기를 설계하였다. 그리고 설계한 제어기를 시스템에 적용하여 실험을 통해 유효성을 시험하였다.

기준입력 $\pm 4[\text{deg}]$ 로 하는 위치 지령신호에 대하여 PD 제어기는 선단위치의 최대 진동성분이 약 $\pm 3 [\text{deg}]$ 의 크기에서 감쇠 진동을 하였으나, H_{∞} 제어기는 진동성분이 최대 약 $\pm 0.25 [\text{deg}]$ 로 오버슈트의 감소는 물론 정상상태에 빠르게 도달하는 안정한 특성을 갖는다. 또한 선단

의 부하변동에 대해서도 H_∞ 제어기가 기존의 PD제어기를 사용한 시스템보다 훨씬 우수하다.

접수일자 : 2002. 4. 19 수정완료 : 2002. 5. 11

참 고 문 헌

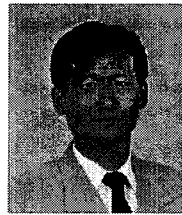
- [1] Wang D. and Vidyasagar M., "Transfer function for a single flexible link," The International Journal of Robotics Research, Vol. 10, No. 5, pp. 540-549, Oct., 1991.
- [2] H. Kanoh, H. G. Lee, "Vibration Control of One-Link Flexible Arm," in Proc. 24th IEEE Conf. Decision Control, Fort Lauderdale, FL, Dec., 1985.
- [3] N. C. Singer, W. P. Seering, "Design and Comparison of Command Shaping Methods for Controlling Residual Vibration," Proc. IEEE Int. Conf. on Robots & Automation, pp. 888-893, 1989.
- [4] P. Gahinet and P. Apkarian, "A linear matrix inequality approach to H_∞ control," Int. J. Robust Nonlinear Control, 4: pp. 421-448, 1994.
- [5] T. Iwasaki and R. E. Skelton, "All controllers for the general H_∞ control problem: LMI existence conditions and state space formulas," Automatica, Vol. 30, No. 8, pp. 1307-1317, 1994.
- [6] P. Gahinet, A. Nemirovskii, A. J. Laub, and M. Chilali, LMI control toolbox, The mathworks Inc., 1994.



신봉철(Bong-Chul Shin)

準會員

1998년 동서대학교 전자공학과 공학사
 2002년 부경대학교 제어계측공학과 석사
 관심분야 : 강인 제어, 디지털 제어,
 Motion Control



이형기(Hyung-Gi Lee)

正會員

1975년 동아대학교 전자공학과 공학사
 1980년 동아대학교 전자공학과 공학석사
 1985년 동아대학교 전자공학과 공학박사
 1980년 ~ 현재 부경대학교

전기·제어 계측공학부 교수

관심분야 : 제어계측시스템 설계, 마이크로프로세서 응용
 기기



최연욱(Yeon-Wook Choe)

正會員

1978년 한양대학교 전자공학과
 1980년 한양대학교 전자공학과 공학석사
 1990년 일본 京都大學校 전기공학과
 공학박사

1996년-1997년 Univ. of South Australia 방문교수
 1990년 ~ 현재 부경대학교 전기·제어계측공학부 교수
 관심분야 : Robust 제어, Digital 제어, 제어 응용 등



안영주(Young-Joo An)

正會員

1986년 부산공업대학 전기공학과
 1988년 부산대학교 공학석사
 1995년 부산대학교 전기공학과 공학박사
 1998년 ~ 현재 부경대학교

전기·제어계측공학부 조교수

관심분야 : 제어계측시스템 설계, 에너지변환