

## 유연한 단일축 로봇트 팔의 위치제어

### A Study on Position Control of a Flexible One-Link Robot Arm

宋 鳳 基\* · 崔 惊 鎬\*\*  
(Bong-Gee Song · Chong-Ho Choi)

#### 요 약

본 논문에서는 출력 되먹임 방법을 이용하여 유연한 로봇트 팔의 위치제어를 하는 문제에 대하여 다루었다.

PD형태의 출력 되먹임을 할 때 팁(tip)의 휨을 줄이는 동시에 정상상태에 도달하는 시간도 빠르게 하기 위하여 되먹임 계수를 시간에 따라 변화시키는 방법을 제시하였다. 계수 변환은 미분가능한 함수로 할수록 입력토크의 변화가 심하지 않아 좋은 결과를 얻을 수 있었다.

모르는 부하질량이 존재하는 경우, 출력중에서 허브(hub)각도의 과도상태를 적당한 시간동안 적분한 값을 보간에 이용하여 부하질량을 추정하였다. 이 방법은 기준입력을 아는 경우에만 사용할 수 있는데 측정잡음이 있는 경우에도 비교적 높은 정확도를 보였다. 따라서 출력 되먹임만으로 부하나 측정잡음의 유무에 관계없이 안정한 제어를 설계할 수 있었다.

**Abstract** - In this paper, an output feedback is used to reduce the effect of the vibration in the control of a flexible one-link robot arm. A PD control method with a time varying gain is proposed to improve the performance of the system in tip deflection and settling time for the step reference input. By making the change of feedback gain smoothly, the input torque can be made smooth. When there is a payload with unknown mass, an interpolation method which uses the integrated value of the transient response of the hub angle is proposed for the estimation of the payload mass. This method can be used when the reference input is known and we can get highly accurate estimate for the unknown payload. It is also demonstrated that flexible one-link arm can be controlled pretty accurately by an output feedback in a noisy environment without knowing the mass of the payload.

#### 1. 서 론

유연한 단일축 로봇트 팔 제어는 많은 사람들의

연구대상이 되고 있는데 이것은 기존의 유연하지 않은 모델(rigid body model)에 비하여 여러가지 장점이 있기 때문이다. 즉, 기존의 로봇트에 비하

여 빠른 속도를 얻을 수 있고 동작시킬 때 전력소모량을 줄일 수 있다. 이러한 장점은 로봇트 팔의 질량을 가볍게 만들기 때문에 얻을 수 있다.

그러나 질량을 가볍게 하기 위해서는 링크의 두께를 줄여야 하는데 이 때문에 로봇트가 움직일 때 진동 현상이 일어나 로봇트 팔끝의 위치가 부정확해지는 단점이 있다. 따라서 로봇트가 동작할 때 진동을 없애주는 제어기를 설계할 수 있다면 위에서 언급한 여러가지 경제적인 효과를 얻을 수 있겠다.

유연한 시스템은 보통 편미분 방정식으로 나타나게 된다. 이와같은 시스템은 차원이 무한대이므로 전체 시스템을 완전하게 다루기는 어렵다. 따라서 시스템을 유한차원의 상미분 방정식으로 근사(approximation) 시켜주는 작업이 필요하다. Cannon[2] 등은 가정보드법을 이용하여 시스템을 진동모드별로 감결합된(decoupled) 모델을 얻었고 Menq[5] 등은 유한요소법을 이용하여 유한차원의 상미분 방정식을 얻었다. 한편 Sciliano[7] 등은 특이섭동법을 이용하여 시스템을 강체모드에 대한 식과 진동모드에 대한 식으로 분리하여 다루었다.

로봇트 팔의 제어에 있어서 안정성과 성능 향상이 목표가 된다. 로봇트 팔에 부하가 있는 경우에는 일반적으로 시스템의 성능이 떨어지게 된다. 따라서 부하량에 따른 성능저하 경향을 알아보고 이를 최대한 보상해 줄 수 있도록 해야한다. 많은 저자들이 상태변수를 사용하여 유연한 단일축 로봇트 팔을 제어하는 문제를 다루었으나 [2] [3] [5], Wang[10]은 출력만을 이용하여 제어하더라도 시스템의 안정성이 보장된다는 것을 보였다. 본 논문에서는 Wang[10] 등이 제안한 출력 되먹임 방법을 변형시켜 부하가 없을 때는 물론 부하가 존재하는 경우에도 안정하며 성능을 향상시킬 수 있는 제어기를 설계하는 방법을 연구한다.

## 2. 유연한 단일축 로봇트 팔의 모델링

유연한 단일축 로봇트 팔에 대한 모델링은 여러 저자들이 연구하여 잘 알려져 있지만[2][5][7][8] 본 논문에서는 필요한 부분만을 기술하도록 한다.

\*正 會 員 : 서울大 大學院 制御計測工學科 卒業  
 \*\*正 會 員 : 서울大 工大 制御計測工學科 副教授  
 · 工博

接受日字: 1990年 4月 26日  
 1次修正: 1990年 9月 10日  
 2次修正: 1990年 12月 24日

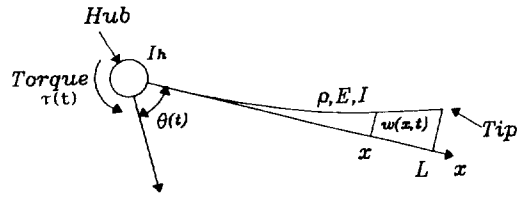


그림 1 유연한 로봇트 팔  
 Fig. 1 Flexible robot arm

유연한 단일축 로봇트 팔이 그림 1에서와 같이 반시계방향으로  $\theta(t)$ 만큼 회전하였다고 하자. 그리고  $r(x, t)$ 를 다음과 같이 정의하자[2][3].

$$r(x, t) = w(x, t) + x\theta(t) \quad (1)$$

이 때,  $x$ 는 구동축으로부터의 거리,  $t$ 는 시간,  $w(x, t)$ 는  $x$ 에서의 휨,  $\theta(t)$ 는 시간  $t$ 에서의 허브 각을 각각 나타낸다. 여기서  $r(x, t)$ 는 진동이 있는 경우 로봇트 팔이 움직일 때의 변위에 해당하는 성분이며 진동이 없는 경우에는  $w(x, t)$ 는 0이 되어 보통의 강체모델과 똑같아 진다.

운동에너지  $T$ 와 위치에너지  $V$ 는 각각 다음과 같다. [6]

$$T = 1/2 I_h \dot{\theta}^2 + 1/2 \int_0^L \rho \left[ \frac{\partial r}{\partial t} \right]^2 dx \quad (2)$$

$$V = 1/2 \int_0^L EI \left[ \frac{\partial^2 r}{\partial x^2} \right]^2 dx \quad (3)$$

여기서  $I_h$ 는 허브의 관성 모멘트,  $\rho$ 는 빔의 선밀도,  $L$ 은 빔의 길이,  $E$ 는 탄성 Modulus,  $I$ 는 빔 단면의 관성 모멘트를 각각 나타낸다.

Hamilton의 원리를 이용하면 시스템은 다음과 같은 4차 편미분 방정식과 4개의 경계조건으로 나타난다[6]

$$\rho \frac{\partial^2 r}{\partial t^2} + EI \frac{\partial^4 r}{\partial x^4} = 0 \quad (4a)$$

경계조건 :

$$\begin{aligned} EI \frac{\partial^2 r}{\partial x^2} \Big|_{x=0} + \tau(t) - I_h \ddot{\theta} &= 0 \\ r(0, t) &= 0 \\ EI \frac{\partial^2 r}{\partial x^2} \Big|_{x=L} &= 0 \\ EI \frac{\partial^3 r}{\partial x^3} \Big|_{x=L} &= 0 \end{aligned} \quad (4b)$$

위의 편미분방정식의 해가 다음과 같은 형태라고 가정하자[6].

$$r(x, t) = \sum_{i=0}^{\infty} \phi_i(x) q_i(t) \quad (5)$$

$\phi_i(x)$ 는 시스템의 진동모드를 나타내는 함수인데 (1)과 비교해 보면,  $i=0$ 일때는 강체모드를 나타내는데 이때

$$\begin{aligned} \phi_0(x) &= x \\ q_0(t) &= \theta(t) \end{aligned} \quad (6)$$

가 된다.

진동모드  $\phi_i(x)$ 는 다음과 같은 직교성[2][3]을 가지며 이를 이용하면 쉽게 상미분방정식을 얻을 수 있다.

$$\int_0^L \rho \phi_i(x) \phi_j(x) dx + I_b \phi_i'(0) \phi_j'(0) = \begin{cases} I_h + I_b & \text{if } i=j \\ 0 & \text{if } i \neq j \end{cases} \quad (7a)$$

$$\int_0^L EI \phi_i''(x) \phi_j''(x) dx = \begin{cases} (I_h + I_b) W i^2 & \text{if } i=j \\ 0 & \text{if } i \neq j \end{cases} \quad (7b)$$

여기서  $I_b$ 는

$$I_b = \int_0^L \rho x^2 dx$$

로서 이것은 빔의 관성 모멘트를 나타내며  $w_i$ 는  $i$  번째 고유진동수이다.

식 (5)를 식 (4a)에 대입하고 (7a), (7b)의 직교성을 이용하여 정리한 다음 Lagrangian  $L$ 을 구하면,

$$\begin{aligned} L &= 1/2 \sum_{i=0}^{\infty} (I_h + I_b) \dot{q}_i^2(t) \\ &\quad - 1/2 \sum_{i=0}^{\infty} (I_h + I_b) w_i^2 q_i^2(t) \\ &\quad - \sum_{i=0}^{\infty} \phi_i'(0) q_i(t) \tau(t) \end{aligned} \quad (8)$$

이 된다.

한편, 시스템의 출력  $y$ 를 허브각으로 잡으면

$$\begin{aligned} y &= \left. \frac{\partial x}{\partial x} \right|_{x=0} \\ &= \theta(t) + \left. \frac{\partial w}{\partial x} \right|_{x=0} \\ &= \sum_{i=0}^{\infty} \phi_i'(0) q_i(t) \end{aligned}$$

로 표시된다.

시스템의 입력을 토크  $\tau(t)$ , 출력을 허브각  $y(t)$ , 그리고 상태벡터  $X$ 를

$$X = [q_0(t) \dot{q}_0(t) q_1(t) \dot{q}_1(t) \dots]^T$$

로 정의한 다음 식 (8)에 Lagrange-Euler 방정식을 적용하면 다음과 같은 상태방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{X} &= FX + Gu \\ y &= HX \end{aligned} \quad (9)$$

$$F = \begin{bmatrix} 0 & 1 & & & \\ 0 & 0 & & & \\ & & 0 & 1 & \\ & & -w_1^2 & 2\zeta w_1 & \\ & & & & \ddots \\ & & & & & \ddots \end{bmatrix}$$

$$G = \frac{1}{I_h + I_b} [0 \ 1 \ 0 \ 0 \ \frac{d\phi_1}{dx}(0) \ 0 \ 0 \ \frac{d\phi_2}{dx}(0) \ \dots]^T$$

$$H = [1 \ 0 \ \frac{d\phi_1}{dx}(0) \ 0 \ \frac{d\phi_2}{dx}(0) \ \dots]$$

위식에서 입력  $u$ 는 토크  $\tau(t)$ 가 된다. 위의 (9)로 표시된 시스템은 차수가 무한대인 식이므로 제어하는데 많은 어려움이 따른다. 따라서 제어기를

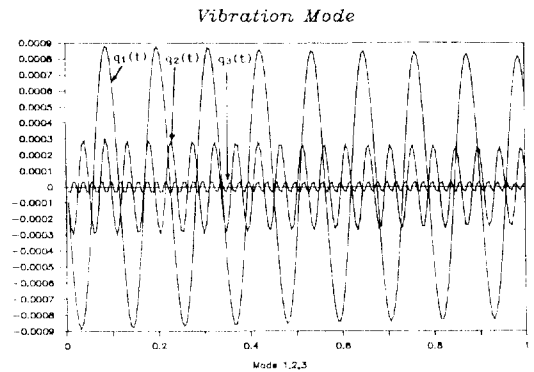


그림 2 단위 임펄스 입력에 대한 응답  
Fig. 2 The response of unit impulse input

표 1 시스템이 계수  
Table 1 System parameters

물리량	기호	크기
길이	$L$	1.0m
두께	$B$	3.4mm
높이	$H$	2.54cm
탄성 Modulus	$E$	$6.9 \times 10^{10} \text{N/m}^2$
단면적의 관성 모멘트	$I$	$8.31934 \times 10^{-11} \text{m}^4$
선 밀도	$\rho$	$0.233172 \text{kg/m}$
빔의 관성 모멘트	$I_b$	$7.7724 \times 10^{-2} \text{kgm}^2$
허브 Inertia	$I_h$	$5.176 \times 10^{-3} \text{kgm}^2$

설계할 때에는 유한한 차수의 근사모델이 필요하다.

모델의 차수를 축소시킬 때 가장 문제가 되는 것은 축소된 모델이 본래의 시스템을 잘 표현할 수 있는지에 대한 점과 축소된 모델로 제어기를 설계하여 본래의 시스템에 적용하였을 때 안정도에 관한 문제점이다. 이 경우 시스템의 근사식에 의하여 절사(truncated)된 부분이 원래의 시스템에 영향을 미치지 않는 제어기를 설계해야 한다. 유연한 시스템은 무한차원의 시스템이므로 특히 안정성 문제에 유의해야 한다. Balas[1]는 이러한 경우에 대한 시뮬레이션 결과를 보여줌으로써 시스템의 축소방법에 대한 중요성을 시사하고 있다.

그림 2는 시스템의 계수들이 표 1과 같을 때 단위 임펄스 입력에 대하여 고유진동수 성분 ( $q_i(t)$ ,  $i=1, 2, 3$ )별로 분리하여 나타낸 것이다. 그림에서 보면 주파수 성분이 커질수록 진폭의 상대적인 크기가 현저하게 줄어들음을 볼 수 있고 이 그림에는 나타나지 않았지만  $i \geq 4$ 일때의  $q_i(t)$  성분은 거의 0에 가깝다.

따라서 실제 제어기 설계에 있어서는 상태벡터가 강제모드( $q_0(t)$ )와 두개의 저주파성분 ( $q_1(t)$ ,  $q_2(t)$ ). 그리고 이들의 시간에 대한 미분성분을 포함하는 6차 시스템으로 한다. 이에 따른 시스템 행렬도 (9)의 F,G,H에서 각 상태들을 포함하고 있는 행과 열을 포함하는 부행렬(submatrix)을 취한다.

시스템 방정식 (9)에서 행렬 F를 보면  $\zeta$ 라는 성분이 있는데 이것은 감쇠계수를 나타낸다. 감쇠작용이 없는 시스템이라면  $\zeta=0$ 이 되지만 어떤 시스템이든지 약간의 감쇠작용이 있게되며 그 값으로는 보통 0.05이하의 값을 갖는 경우가 많다[2][3][4]. 본 논문에서는 감쇠계수가  $\zeta=0.05$ 인 시스템에 대해서 연구하였다.

### 3. 제어기 구성

여기서는 그림 1과 같은 로봇 팔의 단위계단 입력에 대한 응답이 단시간내에 큰 진동없이 잘 따라가게 하기 위하여 허브각을 되먹임하는 제어 시스템의 구성방법에 대하여 알아보겠다.

시스템을 안정화 시키고 원하는 성능을 얻기 위하여 Wang[9][10]등이 제시한 것처럼 PD제어기를 사용하자.

정리 3.1[10]

PD 제어기에서 비례 제어기(Proportional Con-

troller)의 계수를  $K_p$ , 미분 제어기(Derivative Controller)의 계수를  $K_d$ 라고 할 때, 모든  $K_p(>0)$ 와  $K_d(>0)$ 에 대하여 시스템 (9)는 안정하다.

정리 3.1은 (9)와 같이 표시된 시스템의 차수에 관계없이 항상 시스템을 안정하게 하는 PD제어기의 계수의 범위를 제시하였다. 안정도를 만족시키는 PD제어기의 계수중에서 다음과 같은 기능을 갖는 계수들을 선택하는 것이 바람직하다.

- (1) 허브 각도가 정상상태 값의 95%~105%의 값을 유지하기 시작한 시간( $T_h$ )을 작게한다.
- (2) 진동에 의한 틱의 횡이  $\pm 0.5\text{cm}$ (단, 빔의 길이는 1m)이하로 되는 시간( $T_t$ )을 작게한다.
- (3) 빔이 가장 많이 휘는 길이( $L_{max}$ )를 줄인다.

Wang[10]은 여러가지 PD제어기의 계수에 대하여 실험하여 시스템의 특성을 살펴보았다. 그렇지만 PD계수를 상수로 하는 경우에는 다음과 같은 문제점들이 있다.

즉,  $K_p$ 를 계속 크게하고 그에 대응하는  $K_d$ 를 찾지만 하면 설정시간은 점점 빠르게 할 수 있다. 그러나  $K_p$ 를 크게하면 초기에 틱의 횡  $w(x, t)$ 가 커지고 따라서  $L_{max}$ 가 커지게 되므로 무조건 계수만 크게 할 수는 없다. 따라서 본 논문에서는 틱의 횡을 줄이는 동시에 설정시간도 빠르게 하기 위하여 되먹임계수를 초기에는 작은 계수값( $K_{pi}$ ,  $K_{di}$ )에서 시작하여 어느 시간이 지나면 큰계수( $K_{pf}$ ,  $K_{df}$ )로 바꾸어주는 시변계수 방법을 제시하고자 한다. 일반적으로 시변 계수를 이용하면 안정성 보장이 힘들지만 유한시간 동안만 계수변화를 해 주고 그 이후는 고정시켰을 때,  $K_{pf}$ 와  $K_{df}$ 가 정리 3.1의 범위내에 있거나 하면 시스템의 안정성은 변함이 없다. 시변계수를 사용하는 경우 계수변화를 불연속 함수로 하거나, 미분불가능한 함수로 하는 경우, 계수가 변화하는 과도기 시간에 더 큰 틱이 일어나거나 입력토크가 고주파 성분을 많이 갖게된다[11]. 따라서 미분가능한 함수로 잡는 것이 바람직할 것으로 생각되어 (10)과 같이 처음계수와 나중계수를 sine형 함수로 연결하였다.

$$K = \begin{cases} K_i & t < t_1 \\ K_i + 1/2(K_f - K_i) & t_1 \leq t < t_2 \\ -1/2(K_f - K_i) \cos\left(\frac{(t-t_1)}{(t_2-t_1)}\pi\right) & t_1 \leq t < t_2 \\ K_f & t_2 \leq t \end{cases} \quad (10)$$

여기서 ( $K$ ,  $K_i$ ,  $K_f$ )는 ( $K_p$ ,  $K_{pi}$ ,  $K_{pf}$ )또는 ( $K_d$ ,  $K_{di}$ ,  $K_{df}$ )를 의미하며  $t_1$ 은 계수가 변하기

시작하는 시간이고  $t_2$ 는 계수의 변화가 끝나는 시간이다.

부하가 있는 경우 [4][5][10]에는 시스템의 계수 변화에 따라 제어기의 설계를 다르게 해야 하므로 부하의 크기를 알지 못하면 어려움이 따른다. 부하를 모르는 경우 제어기의 설계는 부하의 상한 값에 대한 견실한 제어기를 설계하는 방법 [4]과 부하를 추정하여 제어하는 방법[5]으로 구분할 수 있다.

본 논문에서는 부하의 양을 직접 추정하여 제어하는 방법을 사용하고자 한다. 지금까지 부하의 추정 방법으로는 Menq[5]등이 사용한 경사법 (gradient method)이 제시되었었다. 하지만 경사법을 사용하려면 시스템의 상태들을 모두 알아야 하는데 시스템 방정식 (9)에 나타난 상태벡터의 성분들은 측정가능하지 않다. 따라서 이 방법은 시스템의 상태 추정기를 다시 설계해야하는 번거로움이 따른다.

본 논문에서는 이러한 번거로움을 피하기 위하여 출력 허브각만을 이용하여 부하량을 추정하는 보간방법을 제시하였다.

보간방법을 사용하고 잡음하에서의 영향을 알아보기 위하여 시스템이 다음과 같은 가정을 만족한다고 하자.

가정 3.1 시스템의 출력  $y(t)$ ,  $\dot{y}(t)$ 은 측정가능하다.

가정 3.2  $y(t)$ ,  $\dot{y}(t)$ 의 측정 잡음  $w_1(t)$ ,  $w_2(t)$ 는 각각 평균 0인 백색 가우시안(white Gaussian) 분포를 가진다.

똑같은 제어계수를 사용하였을 경우 부하가 걸려 있는 쪽의 반응이 느리게 되는 것은 충분히 예상할 수 있다. 따라서 특정한 기준입력(즉, 여기서는 단위계단입력)에 대하여 어떤 주어진 시간의 출력을 부하에 대한 식으로 나타낼 수 있다. 여러 가지 부하와 출력의 관계를 미리 표로 만든 다음 모르는 부하가 걸려 있을 경우 그 시간의 출력을 측정, 보간하여 부하를 추정한다. 어느 특정한 시간의 출력을 이용하는 경우, 측정잡음의 영향을 많이 받을 것으로 예상되므로 되도록 많은 시간의 정보를 이용하면 정확도가 높아질 것으로 예상된다. 따라서 출력  $y(t)$ 를 임의의 시간  $t_1$ 에서  $t_2$ 까지 적분한 값  $Q(t)$ 를 보간에 사용하기로 한다. 그런데 실제 출력은 샘플링 한 값이므로 보간에 사용되는 값은

$$Q(t) = \sum_{i=0}^n y(t_1 + i\Delta t) \quad (11)$$

$\Delta t$ : 샘플링 시간

와 같이 쓸 수 있다.

즉, 몇가지 부하질량에 대하여  $Q(t)$ 의 값을 미리 표로 만들어 놓고 실제 제어할 때 얻은  $Q(t)$ 를 보간하여 부하를 추정하게 되는 것이다.

일반적으로 측정잡음이 존재하는 경우에는 정확도가 떨어지게 될것으로 예상된다. 따라서 측정잡음의 존재하는 경우 시스템이 어떤 분포를 가지는지 알아보는 것은 중요한 일이다. 이에 대한 자세한 결과는 4장에서 알아보겠다.

#### 4. 결과 및 해석

시뮬레이션에 사용되는 시스템 계수는 표 1 [13]에 나타나 있다.

실제 시뮬레이션에는 강제 모드와 저주파 성분 두개만 사용하여도 출력을 거의 정확하게 얻을 수 있다.

우선 부하가 걸려있지 않을 때의 반응에 대하여 알아보도록 한다.

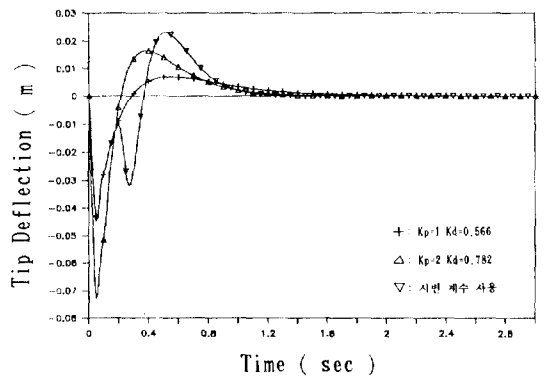
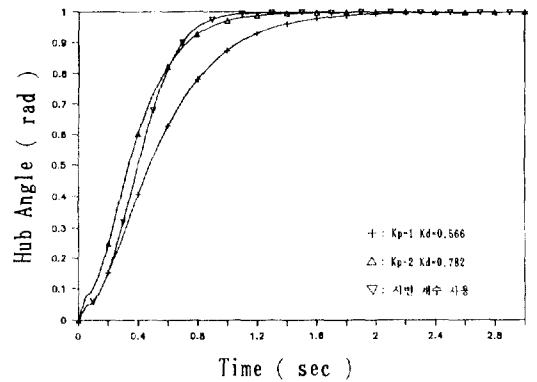
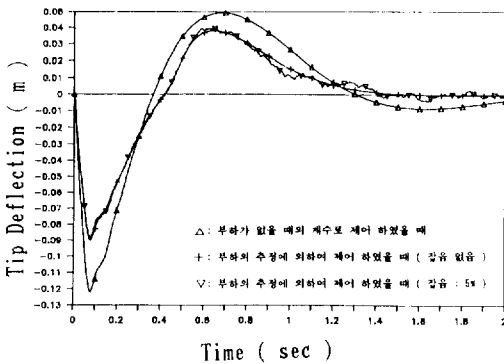
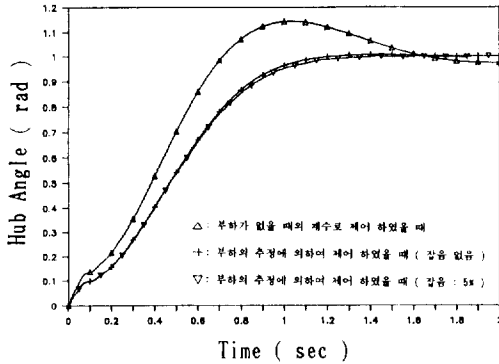


그림 3 시변계수 사용시 팀의 힙과 허브 각도  
Fig. 3 The tip deflection and the hub angle with time varying coefficients

**표 2** 임계 감쇠 응답을 주는 여러 PD계수들  
**Table 2** Several values of PD parameters for critical damping

$K_p$	$K_d$	$T_h$	$T_i$	$L_{max}$
1	0.566	1.32	0.83	4.37
2	0.782	0.90	0.81	7.27
3	0.911	0.66	0.74	9.81



**그림 4** 부하의 추정을 한 경우의 팁의 휨과 허브 각도

**Fig. 4** The tip deflection and the hub angle with estimation of the unknown load

유연한 단일축 로봇 팔의 제어에 있어서 오버슈트가 일어나는 것은 바람직하지 않으므로  $K_p$  및  $K_d$ 의 값을 조정하여 출력이 임계감쇠반응을 가지도록 하였다. 우선 임의의  $K_p$ 에 대하여 시행착오에 의하여  $K_d$ 를 변화시키면서 임계감쇠 반응을 보이게 하는 계수를 찾았고  $T_h$ ,  $T_i$ ,  $L_{max}$ 는 그때의 값들이다.  $K_p$ 와  $K_d$ 의 값들을 표 2에 나타내었다. 표 2를 보면  $K_p$ 가 커질수록 대응되는  $K_d$ 도 커지고 있고,  $K_p$ 와  $K_d$ 를 크게 할수록 설정시간은 점점 빨라지지만 팁의 휨은 커지고 있음을 알 수 있다.

**표 3** 측정 잡음이 있을 때의 부하의 추정  
**Table 3** Estimation of payload with measurement noise ( $\sigma$ : standard deviation of the measurement noise,  $K_p=2$ ,  $K_d=0.782$ )

부하 질량의 비(%)	추정질량(%)			
	$\sigma=0$	$\sigma=0.01$	$\sigma=0.03$	$\sigma=0.05$
10	10.039	9.865	9.519	9.175
20	19.982	19.258	17.838	16.454
30	30.002	30.392	31.181	31.982
40	40.000	39.434	38.320	37.227
50	49.998	50.371	51.125	51.889
60	60.002	61.088	63.317	65.626
70	69.995	71.151	73.526	75.989
80	80.000	80.483	81.401	82.451
90	90.019	89.663	88.957	88.256
100	99.939	98.767	96.484	94.270

부하가 없을 때 그림 3은 시변계수를 사용했을 때의 결과와 표 2의 결과를 비교한 것이다. 여기에서  $K_{pi}=1$ ,  $K_{pf}=3$ ,  $K_{di}=0.566$ ,  $K_{df}=0.911$ 로 하였다.  $K_p=1$ ,  $K_d=0.566$ 으로 했을 경우와 비교했을 때  $L_{max}$ 는 똑같지만  $T_h$ ,  $T_i$ 는 작아지고 있어 빨리 안정 시킬 수 있다. 반면  $K_p=2$ ,  $K_d=0.782$ 와 비교하면  $T_h$ 와  $T_i$ 는 변함없고  $L_{max}$ 가 줄어들어 같은 시간에 안정 시키면서 진동을 줄일 수 있다.  $K_{pf}$ 와  $K_{df}$ 를 더 크게 하거나  $t_2$ 를  $t_1$ 에 더 근접시키면 좋은 결과를 얻을 수 있다. 이상에서 시변 계수에 의한 제어방법이 효과를 거두고 있음을 알 수 있다.

팁에 부하가 걸려 있는 경우, 부하가 없는 것처럼 생각하고 제어를 하게 되면 오버슈트 현상이 일어난다. 부하가 커지면 고유진동수는 감소하고 제어할 때 성능이 좋지 않게 된다.

3장에서 제시한 것처럼 출력만으로 부하질량을 추정하기 위하여 보간방법을 사용하였다. 표 3은  $K_p=2$ ,  $K_d=0.782$ 로 하는 PD제어기에 있어서 측정잡음의 크기에 따라 부하질량과 추정질량을 비교하여 놓은 것인데 [0.3, 0.4] (sec) 동안의 허브 각도와 부하질량의 관계를 나타내는 보간표를 미리 작성한 다음 보간하였다. 측정잡음은 백색잡음으로서 표준편차는 허브가 움직인 각도에 대한 비율로 나타내었다. 잡음이 없는 경우는 추정오차가 1% 내외임을 알 수 있고 잡음이 있는 경우에도 대부분의 경우 오차가 10%이내에 들어감을 볼 수 있다.

그림 4는 모르는 부하가 있고 측정잡음이 있을

때의 최종적인 결과를 나타낸 것이다. 측정잡음이 있는 경우는 측정잡음이 없는 경우보다 부하를 정확히 알 수 없지만 로봇트 팔의 성능이 크게 떨어지지 않고 비교적 좋은 결과를 얻을 수 있었다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 PD제어기를 이용하여 유연한 단일축 로봇트 팔의 성능을 원하는 방향으로 항상시킴을 하였고 부하가 걸려 있을 때에도 출력만을 이용하여 제어하는 방법을 제시하였다.

PD제어기를 이용하는 경우 시변 계수를 사용하는 방법을 제시하여 팀의 회과 설정시간을 동시에 항상시키도록 하였고, 보간 방법을 이용하여 모르는 부하가 있는 경우에도 제어시스템의 성능이 떨어지지 않도록 하였다.

PD제어기의 계수를 시변으로 하는 경우 계수의 최종치가 양수이지만 하면 안정성이 유지됨을 볼 수 있었다.

부하 질량의 추정은 어느 정도의 잡음하에서는 성능이 떨어지지 않고 제어할 수 있을 정도로 정확하였다. 그러나 이 방법은 본 논문에서처럼 기준입력이 계단함수등으로 주어지는 것처럼 기준입력을 미리 아는 경우에만 사용할 수 있다. 기준입력이 불규칙하게 변하는 경우에 대해서는 앞으로 더 연구해야 할 과제이다.

## 참 고 문 헌

[1] M.J. Balas, "Feedback control of flexible systems." IEEE Trans. Auto. Contr., vol. 23, no. 4, pp. 673~679, 1978.  
 [2] R.H. Cannon, Jr. and E. Schmitz, "Initial experiments on the control of a flexible

one-link robot," Int. J. Robotics Res., vol. 3, no. 3, pp. 62~75, 1984.

- [3] H. Krishnan and M. Vidyasagar, "Control of a single-link flexible beam using a Hankel-norm-based reduced order model," IEEE Conf. Robotics Auto., pp. 9~14, 1988.  
 [4] V.V. Korolov and Y.H. Chen, "Robust control of a flexible manipulator arm," IEEE Conf. on Robotics Auto., pp. 159~164, 1988.  
 [5] C.H. Menq and J.S. Chen, "Dynamic Modeling and payload adaptive control of a flexible manipulator," IEEE Conf. on Robotics Auto., pp. 488~493, 1988.  
 [6] L. Meirovitch. Analytical methods in vibrations. Macmillan, 1967.  
 [7] B. Sciliano and W.J. Book, "A Singular perturbation approach to control of light weight flexible manipulators," Int. J. Robotics Res., vol. 7, no. 4, pp. 79~90, 1988.  
 [8] P. Tomei and A. Tornambe, "Approximate modeling of robots having elastic links," IEEE Trans. Syst., Man, and Cybernetics, vol. 18, no. 5, pp. 831~840, 1988.  
 [9] W.J. Wang, S.S. Lu, and C.F. Hsu, "Output feedback control of a flexible robot arm," IEEE Conf. Robotics Auto., pp. 86~90, 1986.  
 [10] W.J. Wang, S.S. Lu, and C.F. Hsu, "Experiments on the position control of a one-link flexible robot arm," IEEE Trans. Robotics Auto., vol. 5, no.3. pp. 373~377, 1989.  
 [11] 송봉기, "유연한 로봇트 팔의 위치제어에 관한 연구", 공학석사 학위논문, 서울대학교, 1990.