

---

# 적응제어 이론을 이용한 유연한 로봇팔의 제어

한종길\*

## The Control of Flexible Robot Arm using Adaptive Control Theory

Jong-Kil Han\*

요약

산업용 로봇의 하중률은 1대 10에서 1대 30이고, 3대 1의 하중률을 가지는 인간과 비교하여 매우 낮다. 다음 세대 로봇의 목표 중에 하나는 하중률이 될 것이고, 이것은 가벼운 로봇을 개발함으로써 가능할 것이다. 2관절 유연한 로봇팔은 관절 축을 회전할 때 진동이 발생한다. 본 논문에서는 유연한 로봇팔의 진동 동력학은 오일러 베르누이의 보 이론과 라그랑지 방정식을 이용하여 구하였고,  $\dot{D}-2C$ 가 skew symmetric하다는 사실을 사용하여, 계산량을 줄이는 리아프노프 안정도 이론을 이용한 단순한 구조의 새로운 제어기를 제안한다. 2링크 유연한 로봇에 대한 확정적인 적응제어 법칙을 제안하고, 시뮬레이션을 통하여 그 타당성을 보인다.

### ABSTRACT

The ration of payload to weight of industrial robot amounts form 1:10 to 1:30. Compared with man who have a ration of 3:1, it is very low. One of the goals for the next generation of robots will be a ration. This might be possible only by developing lightweight robots. When two-link flexible arm is rotated about an joint axis, transverse vibration may occur. In this paper, vibration dynamics of flexible arm is modeled by using Bernoulli-Euler beam theory and Lagrange equation. Using the fact that matrix  $\dot{D}-2C$  is skew symmetric, new controllers which have a simplified structure with less computational burden is proposed by using Lyapunov stability theory. We propose deterministic and adaptive control laws for two link flexible arm, and the validity of the proposed control scheme is shown in computer simulation for two-link flexible arm.

### 키워드

Adaptive control, Deterministic nonlinear controller, Two link flexible arm, Euler-Bernoulli beam theory.

적응제어, 확정적인 비선형 제어기, 2링크 유연한 로봇팔, 오일러 베르누이 보 이론

## 1. 서론

신속한 작업을 하기 위하여 로봇이 고속이며, 경제적인 측면에 있어서는 경량이며 유연해야한다. 오늘날 산업용 로봇의 작업물에 대한 하중률은 인간이 3대 1의 하중률을 가지는데 반하여 1대 10에서 1대 30 정도로 매우 낮다. 그래서 미래의 로봇은 유연하고

가벼운 로봇이라고 볼 수 있다[1]. 그러나 경량의 유연한 로봇은 강체 로봇에 비해 강성이 작으므로 무거운 물체를 다루거나, 고속작업 할 때 구조적인 현상에 의하여 기계적인 진동이 많이 발생하게 된다. 이러한 진동은 로봇팔의 위치제어에 있어서 정밀도 및 안정도에 큰 영향을 미치며 특히 고속의 움직임에 있어서는 더욱더 심각하다. 이러한 사실은 유연한 로봇에

---

\* 한려대학교 멀티정보통신학과(jakan0@yahoo.co.kr)

접수일자 : 2012. 09. 03

심사(수정)일자 : 2012. 09. 20

게재확정일자 : 2012. 10. 05

대한 동력학적 방정식에 근거한 새롭고 강인한 제어기의 개발을 요구한다. 그러나 대부분의 접근은 선형화를 통한 제어[4]나 PD, PID제어[2,3]가 대부분이다. 이러한 이유는 유연한 로봇팔의 동력학이 너무 복잡하여 제어하기 힘들기 때문이며, 대부분 동력학이 단순한 단일관절 로봇팔에 대하여 연구되고 있다[2-6].

본 논문에서는 Lagrange 방정식을 이용하여 2관절 유연한 로봇팔의 동력학적 방정식을 유도하였고, 일반적으로 로봇 시스템에는 많은 불확실성이 존재하며, 단순한 로봇 동력학에 의존한 제어방법으로는 원하는 제어성능을 얻기 힘들다. 그래서 유도된 동력학적 방정식에 근거하여 Lyapunov-like 함수를 활용하여, 유연한 로봇팔에 활용할 수 있는 확정적인 제어기와 새로운 적응제어법칙을 제안하고 제안된 제어법칙의 안정도를 분석한다. 행렬  $\dot{D}-2C$ 이 skew symmetric이라는 사실을 이용하여 제어기 구조를 단순화하였다.

본 논문의 구성은 II장에서는 가정모드 및 Lagrange 방정식을 이용하여 관절 끝 부위에 부하 하중을 갖는 2-관절 유연한 로봇의 동력학적 방정식을 유도하였으며, III장에서는 조인트 각을 원하는 각도로 제어하는 확정적인 제어법칙을 Lyapunov 안정도 이론을 활용하여 제안하였으며, IV장에서는 불확실한 매개변수를 위하여 적응제어 법칙을 제안하고 V장에서는 제안한 제어법칙의 타당성 및 그에 대한 성능을 분석하기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다.

## II. 유연한 팔의 동력학 모델

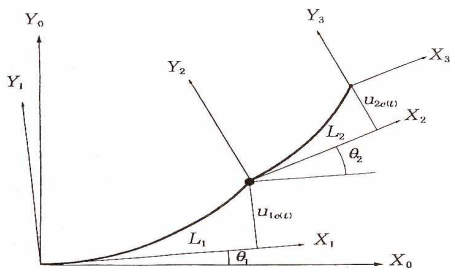


그림 1. 2-링크 유연한 로봇팔  
Fig. 1 Two-link flexible robot arm

본장에서는 2관절 유연한 로봇팔에 대한 동력학 모델을 유도한다.

로봇팔의 길이를  $L_1, L_2$ , 허브에서의 관성을  $J_{h1}, J_{h2}$  링크에서의 관성을  $J_b$ , 관절의 단위 길이 당 질량을  $\rho_1, \rho_2$ , 관절의 Young의 계수를  $E$ , 관절의 횡면적을  $A$ , 횡면적 관성 모멘트를  $I$ 로 정의한다.

로봇 팔의 휨에 대하여 Bernoulli-Euler의 Beam 이론을 적용하면 관절에 대한 방정식은 다음과 같이 표현될 수 있다[8].

$$EI \frac{\partial^4 u(\xi, t)}{\partial x^4} + \rho A L^4 \frac{\partial^2 u(\xi, t)}{\partial x^2} = 0 \quad (1)$$

여기서  $\xi = x/L$ 은 관절의 길이를 정규화한 변수이다.

링크의 횡굴절  $u(\xi, t)$ 는 시간과 공간함수의 곱으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$u(\xi, t) = \sum_{i=1}^{\infty} \phi_i(\xi) \delta_i(t) \quad (2)$$

각각의 시간함수  $\delta(t)$ 와 공간함수  $\phi(\xi)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\delta_i(t) = \exp(jw_i t), \quad w_i^2 = \frac{\beta^4 EI}{\rho A L^4} \quad (3)$$

$$\phi(\xi) = C_1 \sin \beta \xi + C_2 \cos \beta \xi + C_3 \sinh \beta \xi + C_4 \cosh \beta \xi$$

관절의 경계조건을 만족하는  $\beta$ 의 값은 무한히 많으며 이들 각각은 관절의 변형에 대한 공간상의 형태 함수를 특정 짓는다.

Lagrange 접근방식을 이용하여 2-관절 유연한 로봇 팔의 동력학 모델을 유도한다.

전체 운동에너지  $T$ 는 다음과 같이 표현한다.

$$T = T_{hub1} + T_{link1} + T_{hub2} + T_{link2} + T_{load} \quad (4)$$

$$T_{hub1} = \frac{1}{2} J_{h1} \dot{\theta}_1^2 \quad (5)$$

$$T_{hub2} = \frac{1}{2} J_{h2} \dot{\theta}_2^2 + \frac{1}{2} M_{L1} (\dot{\theta}_1 u_1(L_1, t))^2 \quad (6)$$

$$+ (\dot{u}_1(L_1, t) + L \dot{\theta}_1)^2 + \frac{1}{2} J_{L1} \left[ \dot{\theta}_1 + \frac{\partial \dot{u}_1(L_1, t)}{\partial x} \right]^2$$

$$T_{link1} = \frac{1}{2} \int trace({}^0V_1^0 V_1^T) dm \quad (7)$$

$$T_{link2} = \frac{1}{2} \int trace({}^0V_2^0 V_2^T) dm \quad (8)$$

$$T_{load} = \frac{1}{2} M_{L2} (V_{2L} V_{2L}^T) \quad (9)$$

문제를 간단히 하기 위하여 링크상의 운동에너지는 없다고 가정한다.

strain 에너지  $U$ 는 다음과 같다.

$$U = \int_0^L \frac{EI}{2} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x^2} dx$$

$$= \int_0^L \frac{EI}{2} \left[ \sum_{i=1}^m \frac{\partial^2 \phi_i}{\partial x^2} \delta_i(t) \right]^2 dx \quad (10)$$

여기서 mode  $m$ 는 2로 한다.

감쇠  $\delta u$  동안에 점성력에 의하여 형성되는 가상에너지  $\delta W_E$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\delta W_E = - \int_0^L (f u(x,t) \delta u) dx \quad (11)$$

여기서  $f$ 는 점성 마찰계수이다.

다음과 같이 Lagrange 방정식을 적용한다.

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial U}{\partial q_i} + \frac{\partial W_E}{\partial q_i} = F_i, \quad i = 1, 2, 3 \dots 6$$

$$q_1 = \theta_1, q_2 = \theta_2, q_3 = \delta_{11}, q_4 = \delta_{12}, q_5 = \delta_{21}, q_6 = \delta_{22}$$

$$F_1 = u_1, F_2 = u_2, F_3 = 0, \dots, F_6 = 0 \quad (12)$$

다음과 같은 동력학 방정식을 구한다.

$$D \begin{bmatrix} \ddot{\Delta} \\ \dot{\Delta} \end{bmatrix} + C \begin{bmatrix} \dot{\Delta} \\ \Delta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ k\Delta + F\dot{\Delta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau \\ 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

여기서

$$D = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12}^T \\ D_{12} & D_{22} \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12}^T \\ C_{12} & 0 \end{bmatrix}$$

$$\Theta = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix} \quad \tau = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} \text{이다.}$$

등가스프링 상수 행렬  $K$ 와 댐핑 행렬  $F$ 는 다음과 같다.

$$K = \text{diag}(k_1, \dots, k_4)$$

$$F = \text{diag}(f_1, \dots, f_4) \quad (14)$$

행렬  $dD/dt - 2C$ 는 교대 정치행렬이다.

### III. 조인트 각 변위의 확정적 제어기 설계

동력학 방정식에서 변수를 알고 있다고 가정할 경우에 제어 문제는  $\eta(t)$ 가 0 벡터로 수렴하는 동안  $\Theta(t)$ 가 가능한 한 빨리 원하는 궤적  $\Theta_d(t)$ 을 추적하는 입력  $\tau(t)$ 을 결정하는 문제이다.

식(13)에서 제어입력은 다음과 같이 놓는다.

$$\tau_n(t) = \tau(t) - D_{12}^{T\ddot{\eta}} - C_{12}\dot{\eta} \quad (15)$$

다음과 같은 Lyapunov-like 함수를 사용한다.

$$V(t) = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \dot{\Theta} \\ \tilde{\Theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} IP_{12} \\ 0 \quad I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_{11} & 0 \\ 0 & P_{qq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} IP_{12} \\ 0 \quad I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\Theta} \\ \tilde{\Theta} \end{bmatrix} \quad (16)$$

여기서  $I$ 는  $2 \times 2$  단위행렬이고,  $P_{qq}, P_{12}, \Gamma$ 는  $2 \times 2$  symmetric positive definite 행렬이며,  $P_{12} = P_{qq}^{-1} \Gamma$  이고,  $\tilde{\Theta} = \Theta(t) - \Theta_d(t)$ 이다.

$x_e(t) = \begin{bmatrix} \dot{\tilde{\Theta}} \\ \tilde{\Theta} \end{bmatrix}$   $S = \begin{bmatrix} IP_{12} \\ 0 \quad I \end{bmatrix}$  로 놓으면 식(16)은 다음과 같다.

$$V(t) = \frac{1}{2} [S \ x_e]^T \begin{bmatrix} D_{11} & 0 \\ 0 & P_{qq} \end{bmatrix} [S \ x_e] \quad (17)$$

$V(t)$ 을 미분하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= [S \ x_e]^T \begin{bmatrix} \dot{D}_{11}/2 & 0 \\ 0 & P_{qq} \end{bmatrix} [S \ x_e] \\ &+ [S \ x_e]^T \begin{bmatrix} D_{11} & 0 \\ 0 & P_{qq} \end{bmatrix} S \begin{bmatrix} \ddot{\theta} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \\ &+ [S \ x_e]^T \begin{bmatrix} \tau_n - C_{11}\dot{\theta} - D_{11}\ddot{\theta}_d(t) \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (18)$$

이에 대한 안정적인 제어입력은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \tau_n &= D_{11}(\ddot{\theta} - P_{12}\dot{\theta}) + C_{11}((\dot{\theta} - P_{12}\tilde{\theta})) \\ &- (P + P_{qq}\Gamma^{-1}P_{qq})((\dot{\theta} + P_{12}\tilde{\theta}) + P_{qq}\tilde{\theta}) \end{aligned} \quad (19)$$

(18)에 식(19)을 적용하면  $\dot{V}(t)$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= [S \ x_e]^T \\ &\begin{bmatrix} \dot{D}_{11}(\eta)/2 - C_{11} - (P + P_{qq}\Gamma^{-1}P_{qq}) \frac{P_{qq}}{P_{qq}} \\ \frac{P_{qq}}{P_{qq}} \quad -\Gamma \end{bmatrix} [S \ x_e] \end{aligned} \quad (20)$$

$\dot{D} - 2C$ 가 skew symmetric 행렬이므로 식(20)은 다음과 같다.

$$\dot{V}(t) = -[S \ x_e]^T \begin{bmatrix} P + P_{qq}\Gamma^{-1}P_{qq} & -P_{qq} \\ -P_{qq} & \Gamma \end{bmatrix} [S \ x_e] \leq 0 \quad (21)$$

$\eta$ 의 안정도는 정상상태에서  $\theta(t)$ 가  $\theta_d(t)$ 로 수렴한다고 가정하면, 동력학 방정식  $\eta(t)$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} D_{22}\ddot{\eta}(t) + (C_{22} + F)\dot{\eta}(t) + K\eta(t) &= \\ -D_{12}\dot{\theta}_d(t) - C_{21}\dot{\theta}_d(t) \end{aligned} \quad (22)$$

만약 식(22)이 불안정하면, 제안한 제어법칙은 실행 불가능하다. 정상상태에서  $C_{22} + F > 0$ 이며  $\ddot{\theta}_d(t) = 0, \dot{\theta}_d(t) = 0$ 를 선정하면  $D_{22}, C_{22} + F, K$ 가 positive definite 행렬이므로 안정하다.

#### IV. 적응 제어기 설계

본장에서는 앞장에서 제안한 것처럼 제어기를 구성하기 위하여  $D, C, K, F$ 에 포함되어 있는 시스템 변수를 update 할 수 있는 변수 적응법칙을 제안한다. 미지의 시스템 변수가 다음의 형태와 같이 선형인 확정적 제어 법칙을 살펴본다.

$$\begin{aligned} \tau(t) &= \Phi(\ddot{\theta}_d, \dot{\theta}_d, \theta_d, \eta, \dot{\eta}, \ddot{\eta})\Lambda + \Phi_o(\ddot{\theta}_d, \dot{\theta}_d, \theta_d, \eta, \dot{\eta}, \ddot{\eta}) \\ &= D_{12}^T\ddot{\eta} + C_{12}\dot{\eta} + D_{11}(\ddot{\theta}_d - P_{12}\dot{\theta}) + C_{11}(\dot{\theta}_d \\ &- P_{12}\dot{\theta}) - (P + P_{qq}\Gamma^{-1}P_{qq})(\theta_d + P_{12}\tilde{\theta}) \\ &+ P_{qq}\tilde{\theta} \end{aligned} \quad (23)$$

$\Lambda$ 는 미지이므로,  $\hat{\Lambda}$ 는  $\Lambda$ 의 추정인 다음의 제어 법칙을 이용한다.

$$\begin{aligned} \tau(t) &= \Phi(\ddot{\theta}_d, \dot{\theta}_d, \theta_d, \eta, \dot{\eta}, \ddot{\eta})\Lambda + \Phi_o(\ddot{\theta}_d, \dot{\theta}_d, \theta_d, \eta, \dot{\eta}, \ddot{\eta}) \\ &= \hat{D}_{12}^T\ddot{\eta} + \hat{C}_{12}\dot{\eta} + \hat{D}_{11}(\ddot{\theta}_d - P_{12}\dot{\theta}) \\ &+ \hat{C}_{11}(\dot{\theta}_d - P_{12}\tilde{\theta}) \end{aligned} \quad (24)$$

$\hat{\Lambda}$ 을 다음과 같이 정의하면,

$$\tilde{\Lambda} = \hat{\Lambda} - \Lambda \quad (25)$$

위의 제어법칙은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{\tau}(t) &= \\ \hat{\tau}(t) &= \Phi(\ddot{\theta}_d, \dot{\theta}_d, \theta_d, \eta, \dot{\eta}, \ddot{\eta})\Lambda + \Phi_o(\ddot{\theta}_d, \dot{\theta}_d, \theta_d, \eta, \dot{\eta}, \ddot{\eta}) \\ &+ \Phi(\ddot{\theta}_d, \dot{\theta}_d, \theta_d, \eta, \dot{\eta}, \ddot{\eta})\tilde{\Lambda} \end{aligned} \quad (26)$$

만일 Lyapunov-like 함수  $V_1(t)$ 를 다음과 같이 정의하면

$$\begin{aligned} V_1(t) &= V(t) + \frac{1}{2}\tilde{\Lambda}^T P_\theta \tilde{\Lambda} \\ \dot{V}_1(t) &= \dot{V}(t) + [S \ x_e]^T \begin{bmatrix} \Phi\tilde{\Lambda} \\ 0 \end{bmatrix} + \tilde{\Lambda}^T P_\theta \dot{\tilde{\Lambda}} \end{aligned} \quad (27)$$

여기서  $V(t)$ 는  $\tau(t)$ 를  $\hat{\tau}(t)$ 로 교체하면 다음과 같고,  $P_\theta$ 은 크기가 벡터  $\Lambda$ 에 의하여 결정되는 Positive definite 행렬이다.

$$\begin{aligned} \dot{V}_1(t) &= \dot{V}(t) + [S \ x_e]^T \begin{bmatrix} \Phi \tilde{\Lambda} \\ 0 \end{bmatrix} + \tilde{\Lambda}^T P_\theta \dot{\tilde{\Lambda}} \\ &= \dot{V}(t) + [\dot{\tilde{\theta}}, \tilde{\theta}] \begin{bmatrix} I & 0 \\ P_{12} & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi \tilde{\Lambda} \\ 0 \end{bmatrix} + \tilde{\Lambda}^T P_\theta \dot{\tilde{\Lambda}} \\ &= \dot{V}(t) + (\dot{\tilde{\theta}} + P_{12} \tilde{\theta}) \Phi \tilde{\Lambda} + \tilde{\Lambda}^T P_\theta \dot{\tilde{\Lambda}} \end{aligned} \quad (28)$$

여기서  $\dot{V}_1(t) = \dot{V}(t)$ 가 되도록 하기 위하여, 마지막 2개의 항의 합이 0이 되도록 하는 적응제어 매개변수 추정방식을 사용하면 미지의 시스템 변수에 대한 적응 제어를 설계할 수 있다.

$$\dot{\tilde{\Lambda}} = \dot{\tilde{\Lambda}} = -P_\theta^{-1} \Phi^T (\dot{\tilde{\theta}} + P_{12} \tilde{\theta}) \quad (29)$$

### V. 컴퓨터 시뮬레이션

링크2의 끝에 알 수 없는 부하가 존재하고 그 외의 파라미터는 다 알고 있다는 가정 하에 끝점의 부하는 적응제어기를 통하여 추정하였다. 초기에 알 수 없는 부하가 링크2의 끝에 0.01 kg이 있다고 가정했다. Table.1과 Table.2는 실험에 사용된 제어기 파라미터이다. 그림4를 보면 알 수 없는 부하를 추정하는 것을 볼 수 있다. 0.01kg으로 정확하게는 수렴하지 않은 특성을 보이는 것을 알 수 있다. 이것은 특정한 위치로 제어하는 위치제어 있기에 파라미터에 적응 할 수 있는 충분한 정보가 부족하다고 볼 수 있다. 원하는 추정치를 사인파와 같은 값을 사용한다면 충분한 정보가 있기에 정확하게 파라미터를 추정할 수 있을 것이다. 그림2는 링크 1의 허브와 끝점의 각도이며 허브는 원하는 각도에 수렴하는 것을 볼 수 있으며 끝점에서는 진동이 약간 있음을 볼 수 있다. 그림3은 링크2의 허브와 끝점의 각도이며 허브와 끝점에 원하는 각도로 잘 수렴하는 것을 볼 수 있다.

표. 1 제어기 파라미터 값  
Table. 1 Values of control parameter

$P_{12}$	$P_{qq}$	$\Gamma$	$P$
$5I$	$I$	$5I$	$I$

표 2. 유연할 팔의 물리정수  
Table 2. Physical constants of flexible robot arm

$A = 3.00 \cdot 10^{-5}$	$m^2$
$E = 7.03 \cdot 10^{-10}$	$N/m^2$
$I = 6.247 \cdot 10^{-12}$	$m^4$
$\rho = 2.71 \cdot 10^3$	$kg/m^3$
$L_1 = 0.25$	$m$
$L_2 = 0.50$	$m$

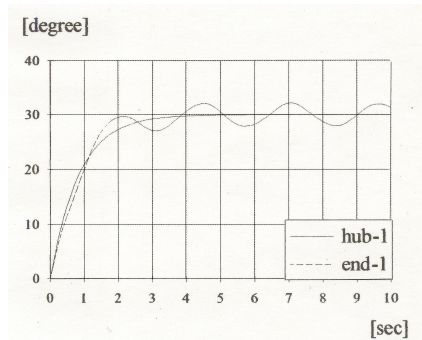


그림 2. 링크1의 허브와 끝점 각도  
Fig. 2 Angle of hub and tip for link 1

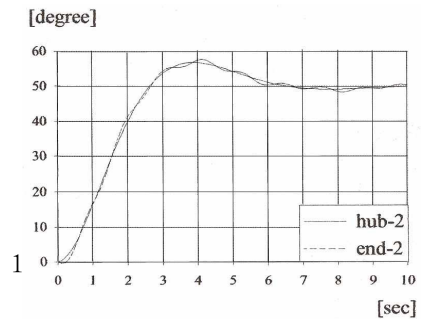


그림 3. 링크2의 허브와 끝점 각도  
Fig. 3 Angle of hub and tip for link 2

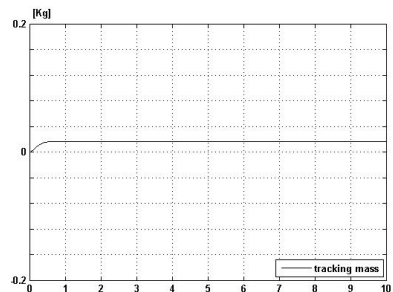


그림 4. 부하의 추정치  
Fig. 4 Estimate of load mass

## VI. 결 론

2관절 유연한 로봇팔의 동력학 모델을 오일러 베르누이 빔 이론과 Lagrange 방정식을 사용하여 유도하였고, 일반적으로 로봇 시스템에는 많은 불확실성이 존재하며, 단순한 로봇 동력학에 의존한 제어방법으로는 원하는 제어성능을 얻기 힘들다. 그래서 유도된 동력학적 방정식에 근거하여 Lyapunov-like 함수를 활용하여, 유연한 로봇팔에 활용할 수 있는 새로운 확정적인 제어기와 적응제어법칙을 제안하고, 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 제안된 제어기의 효율성과 성능을 분석하였다. 최소의 진동을 갖으면서 빠르게 수렴하는 최적의 경로와 제어법칙, 그리고 끝점의 진동 모드  $\eta(t)$ 을 관절입력으로 직접 제어할 수 있도록 계속 연구할 예정이다. 그래서 인간의 특성과 같이 하중을 높임으로서, 상대적으로 로봇의 무게가 줄고 부피도 작아지고 로봇제작 비용도 줄 것이며 에너지 효율성도 좋아질 것이다. 특히 고가의 우주탐사 로봇이나 우주선과 해양탐사 로봇 분야에서 많이 활용될 수 있을 것이다.

## 참고 문헌

- [1] P.Kopacek, K.Desoyer and P.Lugner "Modeling of flexible robots - an introduction", IFAC Symposium, Karlsruhe, FRG, pp. 20-28, 1988.
- [2] I.H.A, E.Yolacan, H.M.E, Z.Bingul, "PID and state feedback control of a single-link flexible joint robot manipulator", Mechat. IEEE intern. Conf., pp. 409-414, 2011.
- [3] M.T.Ho, Y.W.Tu, "position control of a single-link flexible manipulator using  $h^\infty$ -based PID control", Control theo. and appl. IEEE proce., Vol. 153, pp. 615-622, 2006.
- [4] A.Arisoy, M.Gokasan, O.Bogosyan, "partial feedback linearization control of a single flexible link robot manipulator", Proc. of 2nd inter. conf., pp. 282-287, 2005.
- [5] R.J.Wai, M.C.Lee, "Intelligent optimal control of single-link flexible robot arm", IEEE Trans. Indu., Vol .51, pp. 201-220, 2004.
- [6] V.Etxbarria, A.Sanz, "Control of a lightweight flexible robotic arm using sliding modes", I.J.

of advanced robotic systems, Vol. 2, pp. 103-110, 2005.

- [7] A. Green, J.Z.S., "Heuristic design of a fuzzy controller for a flexible robot", Control Systems Tec., IEEE Trans., Vol. 14, pp. 293-300, 2006.
- [8] B.Band., T.C.M, M.U. "Modeling, control and implementaion of smart structures", Springer verlag, 2007.
- [9] 서동진, 노성우, 고낙용, "두 개의 거리 센서를 이용한 차륜형 로봇의 이동물체 추종제어", 한국전자통신학회논문지, 6권, 5호, pp. 765-773, 2011.
- [10] 문용선, 노상현, 조광훈, 배영철, "다수의 모터를 활용한 로봇관절 구조 설계", 한국전자통신학회 논문지, 7권, 2호, pp. 417-423, 2012.
- [11] 김종선, "센서리스 BLDC 전동기의 강인한 속도 제어", 한국전자통신학회논문지, 3권, 4호, pp. 266-275, 2008.
- [12] 한종길, 배성환, 양근호, "슬라이딩 섹터 제어를 이용한 유연한 로봇 팔에 대한 제어기 설계", 한국전자통신학회논문지, 5권, 5호, pp. 541-546, 2010.
- [13] 김상원, 조선호, 허윤석, "구운 이동 로봇의 퍼지 제어기 연구", 한국정보기술학회논문지, 6권, 1호, pp. 11-17, 2008.

## 저자 소개



### 한종길(Jong-Kil Han)

1992년 전북대학교 전자공학과 졸업(공학사)

1994년 전북대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)

2002년 전북대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학박사)

1997년 한려대학교 멀티정보통신 교수

※ 관심분야 : 자동제어, 로봇제어