

# 슬라이딩 모드를 가진 2-자유도 제어기를 이용한 유연한 로봇 조작기의 끝점 위치 제어

## Tip Position Control of Flexible Robot Manipulators Using 2-DOF Controller with Sliding Mode

신 호 필, 이 종 광, 강 이 석  
(Hyo-Pil Shin, Jong-Kwang Lee, and E-Sok Kang)

**Abstract** : The position control accuracy of a robot arm is significantly deteriorated when a long arm robot is operated at a high speed. In this case, the robot arm must be modeled as a flexible structure, not a rigid one, and its control system should be designed with its elastic modes taken into account. In this paper, the tip position control scheme of a one-link flexible manipulator using 2-DOF controller with sliding mode is presented. The robot consists of a flexible arm manufactured with a thin aluminium plate, an AC servo motor with a harmonic drive for speed reduction, an optical encoder and a CCD camera as a vision sensor for on-line measuring the tip deflection of the flexible arm. Simulation and experimental results of the flexible manipulator with a proposed controller are provided to show the effectiveness of the controller.

**Keywords** : tip position control, flexible manipulator, 2-DOF controller, sliding mode, vision sensor

### I. 서론

서보 시스템(servo system)의 구동 제어 목표는 시스템 매개변수(parameter)의 큰 변동과 시변 외란(time-varying disturbance)에 기인하는 오차를 허용범위 내로 줄이면서 신속하고 진동 없는 과도응답 특성을 얻는 것이라 할 수 있다. 유연한 팔을 가진 로봇과 같은 미지의 부하에 따른 매개변수의 변화가 있는 서보 시스템인 경우, 시스템이 복잡하고 비선형성이 커서 기존의 선형제어기 설계만으로는 이러한 성능 요구조건을 만족시키기 어렵다. 따라서 요구되는 성능 조건을 만족시키기 위하여 적응제어기를 포함한 다양한 비선형 제어기에 관한 연구가 수행되어 왔다.

유연한 로봇 팔의 진동 및 위치 제어에 관한 연구는 크게 폐회로 피드백 기법과 입력 다듬기 기법으로 나눌 수 있다. 폐회로 피드백 기법에 대한 연구는 스트레인 게이지를 이용한 최적제어[1][2] 및 슬라이딩 모드 제어[3][4], 역동력학(inverse dynamics)을 이용한 진동제어[5], 가속도 신호를 이용한 PID 제어[6] 등과 같이 다양하게 시도되고 있다. 또한 제어기의 구조가 간단하고 적용이 쉬운 입력 다듬기 기법[7][8][9]에 대한 연구도 유연 구조물 진동 제어의 새로운 대안이 되고 있다.

이들 제어기법은 제어기 설계에 필요한 시스템의 파라미터 값이 변하거나 미리 알지 못할 경우 제어의 성능이 저하된다. 따라서 로봇이 비 반복 작업이나 미지의 질량을 가진 물체에 대해 작업을 하는 경우 효과적인 제어를 하기 위해서는 파라미터의 값을 실시간으로 추정하여 제어를 하는 적응제어[10][11]를 적용해야 한다. 적응제어 기법을 적용할 경우 파라미터 값의 추정에 많은 계산량이 소요되며, 파라미터의 값이 추정되어도 유연한 로봇 팔 시스템의

경우 1차 모드 주파수가 시스템 대역폭(band width) 부근에 존재하여 진동을 효과적으로 감쇠시키기 어렵다.

이러한 점을 고려하여 본 논문에서는 유연한 로봇 팔 끝점 위치 제어에 적용할 수 있는 그림 1과 같은 모델 추종 슬라이딩 모드 제어기(MFSMC; Model Following Sliding Mode Controller)와 저역 통과 필터의 구조를 한 전향제어기를 결합한 2-자유도 제어기를 제안한다. 제안된 제어기는 목표 회전각 위치제어에는 내부 피드백 제어기가 그 역할을 담당하고 외부 전향제어기는 팔의 고유 모드 진동을 가진하는 에너지를 줄이도록 입력을 다듬는 역할을 하도록 하여 폐회로 피드백 기법과 입력 다듬기 기법의 장점을 이용하도록 하였다.

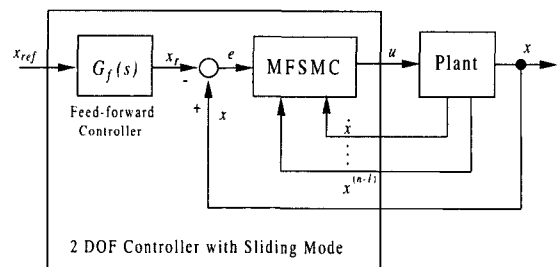


그림 1. 슬라이딩 모드를 가진 2-자유도 제어기.  
Fig. 1. 2-DOF controller with sliding mode.

2-자유도 제어기의 내부 피드백 제어기로 제안된 모델 추종 슬라이딩 모드 제어기는 Elmali와 Olgac[12]이 제안한 섭동 추정기를 가진 슬라이딩 모드 제어기(SMCPE; Sliding Mode Controller with Perturbation Estimation)에 위치추종 시스템에 적합하도록 모델추종 기법을 추가한 제어기로 기존의 슬라이딩 모드 제어(SMC; Sliding Mode Control) 적용 시 제약조건이 되는 불확실성의 한계 값에 대한 사전지식을 필요로 하지 않아서 설계가 쉬우며,

입력 변수의 미분 항을 요구하지 않아 서보 시스템에 적용이 가능한 잇점을 갖는다.

한편, 제어 시스템은 상태의 측정이 매우 중요하며, 전체 시스템의 성능은 일반적으로 상태 측정의 수를 늘리거나 상태 측정의 정밀도를 향상시킴으로써 개선된다. 유연한 로봇 팔을 제어하는 경우 제어 성능을 향상시키기 위해서는 진동하는 빔의 끝점 위치를 측정하는 것이 중요하다. 이를 위하여 본 논문에서는 CCD 카메라를 비전 센서로 이용하였다. 카메라를 통한 영상처리는 방대한 량의 데이터로 인해 연산 시간이 너무 길다는 단점을 가지나 움직이는 물체의 변위를 효과적으로 측정할 수 있는 대안이 되고 있다[11].

비전 센서를 이용한 유연한 로봇 조작기의 끝점 위치 제어에 대한 전산 수치 해석과 실험을 통하여 제안된 제어기의 효용성을 입증하였다.

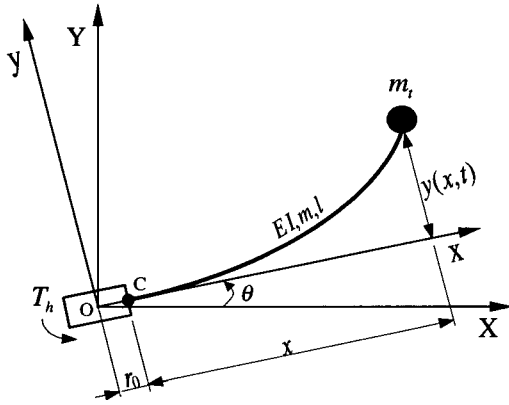


그림 2. 유연한 조작기의 모델링.  
Fig. 2. Modeling of the flexible manipulator.

II. 수학적 모델[2][9][11]

단일링크로 구성된 유연한 로봇 팔 제어기는 그림 2와 같이 길이  $r_0$  인 허브에 고정된 첨단질량이 부착된 Euler-Bernoulli 보로 이상화하여 해석한다. 그림에서 OXY는 허브 회전 중심이 원점인 절대좌표계이며, Oxy는 보와 같이 회전하는 상대회전 좌표계이다. 회전 좌표계의 x축은 C점을 지나는 외팔 보의 접선방향 y축은 이에 직교하는 방향이다. 팔 길이 방향의 위치  $x$ 는 계산 편의를 고려하여 C점으로부터의 값을,  $y(x, t)$  는 보의 횡방향 변형량을 나타낸다. 원심력, 로봇 팔의 축 및 폭방향의 변위, 중력 및 회전시 발생하는 Coriolis 영향을 무시하고 로봇 팔의 횡방향 진동에 대한 운동방정식과 경계조건을 Hamilton의 원리를 이용하여 유도한 후 Galerkin 모드합 방법을 사용하여 해를

$$y(x, t) = \sum_{j=1}^n \phi_j(x) q_j(t) \tag{1}$$

와 같이 가정하면 모드에 관련된 다음 식을 구할 수 있다.

$$M \ddot{Q} + KQ = \ddot{\theta} F \tag{2}$$

여기서  $n$  은 가정된 모드 수이며,  $q_j(t)$  는 일반화된 좌표,  $\phi_j(x)$  는 경계조건을 만족하는 비교함수이며,  $M, K, F$  는 각각 질량, 강성 및 힘 행렬을 나타낸다.

(2)의 행렬식에 대한 모달 행렬  $P$ 를 구하여

$$Q = PH \tag{3}$$

로 상사변환을 하고 직교성 조건을 적용하면 다음과 같은 비연성(decouple) 식을 얻을 수 있다.

$$\ddot{H} + \Lambda H = \ddot{\theta} E \tag{4}$$

여기서

$$\Lambda = P^T K P = \text{diag}(\omega_1^2, \dots, \omega_n^2) \tag{5}$$

$$E = P^T F$$

여기서  $\omega_i$  는 로봇 팔의  $i$  번째 모드의 고유진동수를 나타낸다. 또한, 구동부의 토크 평형식은 다음과 같다.

$$K_t V = J \ddot{\theta} + B \dot{\theta} + S^T H + T_f \tag{6}$$

여기서

$$S^T = EI \{ r_0 \phi_1'''(0) - \phi_1''(0) \}, \dots, \{ r_0 \phi_n'''(0) - \phi_n''(0) \} P$$

이며,  $J$ 는 하모닉 드라이버 및 CCD 카메라를 포함한 구동부의 관성 모멘트,  $B$ 는 점성 마찰 계수,  $K_t, V$ 는 각각 모터의 회전력 상수와 구동 명령전압을,  $T_f$ 는 모터의 쿨롱(Coulomb) 마찰을 나타낸다. 또  $S^T H$ 는 로봇 팔이 모터의 회전 축에 미치는 굽힘 모멘트와 전단력에 관련된 항을 나타낸다.

III. 슬라이딩 모드를 가진 2-자유도 제어기

2-자유도 제어기는 내부 궤환 제어기와 전향 제어기로 구성되며 이들 제어기의 설계에 대하여 설명하면 다음과 같다.

1. 모델 추종 슬라이딩 모드 제어기 설계

본 논문에서는 2-자유도 제어기의 내부 궤환 제어기로 SMC의 단점 중의 하나인 시스템의 계수값의 변화와 외란으로 대별되는 섭동의 상한값을 적용하는 대신에 시간지연 신호로부터 그 값을 추정하여 이용하는 SMCPE에 기준모델을 추종하는 기법을 추가한 MFSMC에 대하여 설명하기로 한다.

다음 (1)과 같은  $n$ -차 비선형계를 고려하자.

$$\dot{x}^{(n)} = f(X, t) + b(X, t)u + \Psi(X, t) \tag{7}$$

여기서  $x$ 는 시스템의 출력,  $X$ 는 상태변수,  $f$ 와  $b$ 는 각각 비선형 요소들이며,  $u$ 는 제어 입력이며,

$$\Psi = \Delta f + \Delta b u + d \tag{8}$$

는 섭동으로 matching condition을 만족하며, 유한한 상한 값을 갖는  $f$ 와  $b$ 에서의 불확실성과 외부의 외란  $d$ 의 영향을 합한 항을 나타낸다. 제어 목표는 섭동의 영향하에서 기준 궤적  $x_r(t)$ 을 추종하도록 하는 것이다.

SMC의 설계는 슬라이딩 면의 결정과 빠른 시간 내에 안정적으로 선정된 슬라이딩 면에 접근하도록 하는 동력학을 설계하는 두 부분으로 나눌 수 있다. 이 중 슬라이딩 면의 결정은 시스템의 최종 추종성능을 표현하는 것으로 매우 중요하다. 여기서는 기준 모델 추종형 슬라이딩 면을 제안하기로 한다.

1.1 기준모델 추종형 슬라이딩 면

다음과 같은 시스템의 기준모델을 고려해 보자.

$$x_m^{(n)} + a_1 x_m^{(n-1)} + \dots + a_n x_m = a_n x_r \tag{9}$$

여기서  $x_m$ 은 기준모델의 출력,  $x_r$ 은 기준입력을 나타낸다. 여기에 완전한 추종상태,

$$\begin{aligned} x_r &= x_m \\ x_r^{(k)} &= 0, \quad k = 1, \dots, n \end{aligned} \tag{10}$$

인 경우를 고려하면, 오차 동력학 식은,

$$e^{(n)} + a_1 e^{(n-1)} + \dots + a_{n-1} \dot{e} + a_n e = 0 \tag{11}$$

이 되며, 여기서  $e (= x_m - x_r)$ 는 추종오차를 나타낸다.

(11)을 SMC의 최종목표인 슬라이딩 면에 도달한 상태 ( $\sigma = 0$ )로 설정하고, 추종오차를 없애기 위하여 적분형을 사용하면

$$\dot{\sigma} = e^{(n)} + a_1 e^{(n-1)} + \dots + a_{n-1} \dot{e} + a_n e \tag{12}$$

로 둘 수 있다. (10)과 (12)로부터 슬라이딩 함수는

$$\sigma = x^{(n-1)} + \dots + a_{n-1} x + a_n \int (x - x_r) dt \tag{13}$$

이 된다. 따라서 (13)과 같은 슬라이딩 면을 선정할 경우 제어시스템은 기준모델 (9)를 추종하게 되며,  $a_1, \dots, a_n$ 은 기준모델의 계수이다.

1.2 접근 모드 동력학 설계[12]

SMC 제어는 시스템을 슬라이딩 면을 향하여 움직이게 하는 접근상태와 추적오차를 점근적으로 0에 수렴하도록 하는 슬라이딩 상태로 구성된다. 안정적인 슬라이딩 면으로의 접근과 수렴을 보장하기 위하여 잘 알려진 입력조건 (attractivity condition)  $\sigma \dot{\sigma} \leq 0$ 를 만족시키는 다음과 같은 도달법칙 접근법 (reaching law approach)[13]에 근거한  $\sigma$ -동력학을 적용한다:

$$\dot{\sigma} = -h\sigma - k \operatorname{sgn}(\sigma) \tag{14}$$

여기서  $h$ 와  $k$ 는 양수이며,  $\operatorname{sgn}(\sigma)$ 는 부호함수이다. (13)을 대입하여  $u$ 에 대하여 풀면 제어법칙은 다음과 같이 된다.

$$u = b^{-1}[-h\sigma - k \operatorname{sat}(\sigma) - f - \xi + a_n e - \Psi] \tag{15}$$

여기서  $\xi = \sum_{k=1}^n a_k x^{(n-k)}$ 이며, 채터링을 방지하기 위하여  $\operatorname{sgn}(\sigma)$ 는 Slotine[2]이 제안한 다음

$$\operatorname{sat}(\sigma) = \begin{cases} \sigma/\epsilon, & |\sigma| \leq \epsilon \\ \operatorname{sgn}(\sigma), & |\sigma| > \epsilon \end{cases}$$

으로 표현되는 포화함수로 대체하였다. 또한

$$\hat{\Psi} = \hat{x}^{(n)} - f(t-\tau) - bu(t-\tau) \tag{16}$$

는 (8)의 섭동 추정값,  $\tau$ 는 샘플링 주기이다. 이는 제어 동작보다 샘플링 속도가 훨씬 빠르다는 가정하에 Youcef-Toumi[14]가 제안한 시간지연 추정 알고리즘을 이용하여 추정된 섭동을 나타낸다. 또한  $\hat{x}^{(n)}$ 은 1차 전방 차분 근사화가 사용되었다.

$$\hat{x}^{(n)} = [x^{(n-1)}(t) - x^{(n-1)}(t-\tau)]/\tau \tag{17}$$

(15)를 보면 시스템의 제어 입력에 기준 입력의 미분항을 포함하고 있지 않음을 알 수 있다. 이는 위치 추종시스템의 기준입력이 계단입력의 형태로 인가될 경우 기준 입력에 대한 미분값을 이용할 수밖에 없는 기존 제어기의 단점을 보완한다.

시스템 (7)에 (15)를 적용하면 다음  $\sigma$ -동력학에 이른다.

$$\dot{\sigma} = -h\sigma - k \operatorname{sat}(\sigma) + \Delta\Psi \tag{18}$$

여기서  $\Delta\Psi = \Psi - \hat{\Psi}$ 는 섭동추정값의 오차이다.

경계  $\epsilon$ 으로의 입력조건을 강화하기 위하여 이득,  $k \geq |\Delta\Psi|$  되게 선정해야 한다. 또 하나의 가정  $|\Delta\Psi| \leq \eta |\hat{\Psi}|$  ( $0 \leq \eta \leq 1$ )을 도입하면 다음과 같이 된다.

$$k = \eta |\hat{\Psi}| \tag{19}$$

여기서  $\eta$ 는 실험적으로 결정되는 상수이다.

2. 전향 제어기 설계

전향제어기는 로봇 팔의 진동 모드 가진 에너지를 줄이기 위하여 저역 통과 필터를 사용하였으며 전달 함수는 다음과 같다.

$$G_f(s) = \frac{\omega_f^2}{s^2 + 2\zeta_f \omega_f s + \omega_f^2} \tag{20}$$

3. 유연한 로봇 팔 끝점 위치 제어기 설계

제어기를 설계하기 위한 로봇 팔 시스템 모델과 출력은 (6)으로부터 다음 식과 같은 점성 및 쿨롱 마찰을 외란으로 취급하고 로봇 팔의 1차 모드만을 고려한 2차 축소 모델을 사용하기로 한다.

$$\begin{aligned} \ddot{\theta} &= a_1 H_1 + bu + \Psi \\ \theta_t &= \theta + a_2 H_1 \end{aligned} \tag{21}$$

여기서

$$\begin{aligned} a_1 &= \frac{S_1 H_1}{J} \\ a_2 &= \frac{(\Phi P)_1}{l + r_0} \\ b &= \frac{K_t}{J} \end{aligned} \quad (22)$$

이며,  $\Psi$ 는 모델 안된 동력학, 외란 및 점성과 클롱 마찰력을 포함한 섭동을 나타내며,  $u$ 는 서보 드라이버에 가해지는 명령 전압을 나타낸다.

또한, 슬라이딩 함수는 (13)으로부터

$$\sigma = \dot{\theta} + 2\zeta\omega_n\theta + \omega_n^2 \int (\theta_t - \theta_r) dt \quad (23)$$

으로 선정하면 제어 입력은 (15)로부터

$$\begin{aligned} u &= b^{-1}[-h\sigma - ks\sigma(\sigma)] \\ &\quad - a_1 H_1 - 2\zeta\omega_n \dot{\theta} - \omega_n^2(\theta_t - \theta_r) - \dot{\Psi} \end{aligned} \quad (24)$$

여기서

$$\begin{aligned} \dot{\Psi} &= \ddot{\theta} + a_1 H_1(t - \tau) - bu(t - \tau) \\ k &= \eta | \dot{\Psi} | \end{aligned} \quad (25)$$

이 되며,  $\ddot{\theta}$ 는 (17)과 같이 각속도 신호를 수치 미분하여 적용한다.

#### IV. 실험

##### 1. 실험 장치

실험장치는 그림 3과 같이 하모닉 드라이버가 부착된 AC 서보 모터에 의해서 구동되는 강체 허브에 얇은 알루미늄 판으로 제작된 유연한 로봇 팔을 부착하여 구성하였다. 팔의 다른 한쪽 끝에는 홀더를 부착하여 첨단질량을 부착하고 변경할 수 있도록 하였다. 팔의 회전각은 모터 회전 축에 부착되어 있는 엔코더를 이용하여 측정하고, 로봇 팔의 끝점 변위 측정은 비전 센서를 사용하였다. 이들 물리량을 컴퓨터와 연결하기 위하여 엔코더 펄스 신호는

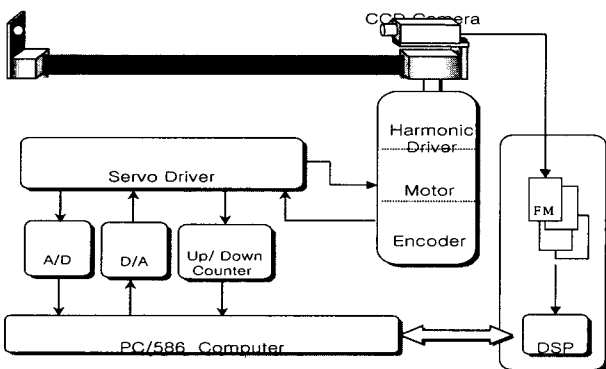


그림 3. 실험장치 개략도.  
Fig. 3. Schematic of the experimental equipment.

24비트 카운터를 이용하고, 이들은 다림제어기술의 Data Acquisition Board를 통하여 586 PC와 연결하고 계산된 제어입력은 DA 변환기를 통하여 서보 드라이버로 전달하도록 하였다. 사용된 실험장치의 파라미터 값은 다음 표 1과 같다.

표 1. 유연 로봇 시스템의 계수 값.

Table 1. Parameters of the flexible robot system.

Parameters		Value
Length of the flexible link ( $l$ )		0.87 m
Mass per unit length of the flexible link ( $m$ )		0.222 kg/m
Bending stiffness of the flexible link ( $EI$ )		1.6 Nm <sup>2</sup>
Tip mass ( $M$ ) (Percentage to the mass of the flexible link)	mass 1	0.023 kg (12%)
	mass 2	0.054 kg (28%)
	mass 3	0.104 kg (54%)
	mass 4	0.209 kg (108%)
Hub length ( $r_0$ )		0.051 m
Inertia of the hub ( $J_k$ )		0.32 kgm <sup>2</sup>
Total inertia of the flexible arm system ( $J$ )		0.746 kgm <sup>2</sup>
Proportional gain of the driving system ( $K_t$ )		16.98 Nm/V
Friction torque in hub ( $T_f$ )		0.08 Nm
Gear reduction ratio ( $N$ )		80
Damping ratio of the flexible arm ( $\zeta$ )		0.019

##### 2. 시스템 파라미터 측정

수치 해석과 실험을 위한 제어기의 설계를 위하여 실험 장치의 파라미터 값을 측정하기 위한 주파수 영역과 시간 영역의 응답실험을 실시하였다. 실험 결과와 측정된 파라미터 값을 적용한 해석 모델의 수치 해석 결과는 다음과 같다.

##### 2.1 주파수 응답 시험

첨단질량 2를 가진 로봇 팔을 부착하지 않은 시스템과 부착한 시스템에 대하여 0.5 V와 1 V 정현파 입력전압에 대한 허브 회전각의 주파수 응답 실험 결과를 그림 4에 보였다.

결과를 통하여 구동부는 입력 전압의 크기에 대해 서로 다른 응답 특성을 보여 비선형 마찰 특성을 가짐을 알 수 있다. 그러나 응답 특성으로 보아 2차 시스템으로 모델링할 수 있으며, 팔이 부착된 경우 1차 진동 모드는 분명히 구별할 수 있으나 나머지 진동 모드는 구별할 수 없는 것으로 보아 1차 모드가 지배적임을 알 수 있다.

##### 2.2 계단 응답 실험

로봇 팔을 부착하지 않은 구동부에 대해 비례 이득 0.7인 비례 제어기로 20° 및 45° 입력에 대한 계단 응답 결과를 그림 5에 보였다. 수치 해석과 실험 결과가 서로 잘 일치하는 것으로 보아 수치 해석 모델과 실험을 통하여 구

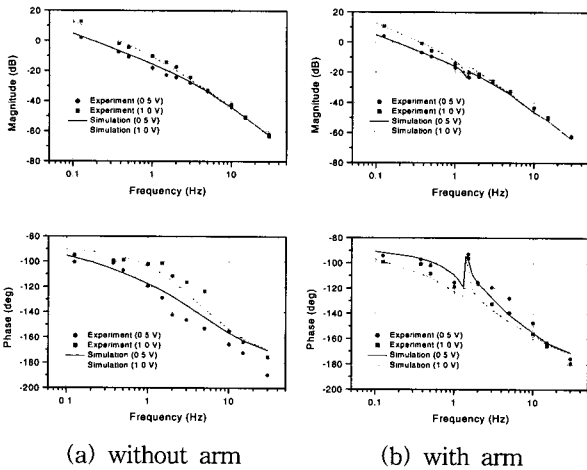


그림 4. 주파수 응답 시험 결과.

Fig. 4. Frequency response test results.

하여 적용된 파라미터 값이 타당함을 알 수 있다. 허브 속도 응답의 초기에 보이는 하향 노치형 응답은 모터의 기동 토크를 줄이기 위하여 제작회사에서 부가한 구동회로에 의한 것으로 판단된다.

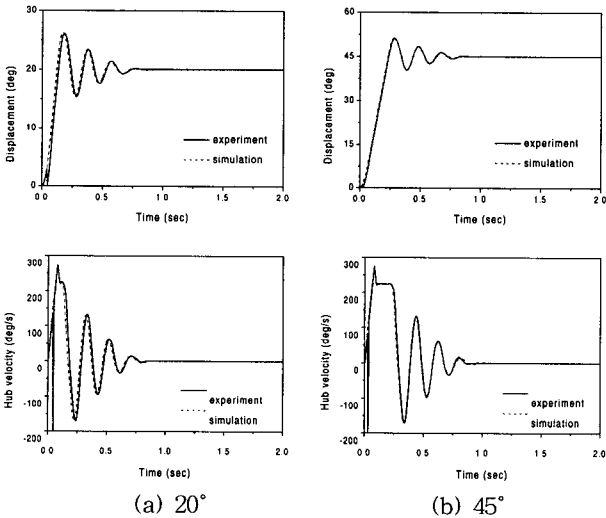


그림 5. 계단응답 실험 결과.

Fig. 5. Step response test results.

3. 수치 해석 및 실험 결과

수치 해석은 MathWork Inc.의 Matlab/Simulink 5.2를 사용하였으며, 로봇 팔의 진동 모드를 4차까지만 고려하였다. 수치 해석과 실험에 사용된 실험 장치의 파라미터 값은 표 1과 같으며, 제어기의 계수 값은 다음 표 2와 같다. 제어 입력 계산을 위한 샘플링 주기는 5 ms를 사용하고, 비전 센서를 통한 끝점 위치 측정에는 30 ms의 샘플링 주기를 사용하는 이중 샘플링 속도 제어를 하였다.

수치 해석과 실험은 기준 입력 변화의 경우와 첨단 질량의 변경에 따른 시스템 파라미터가 변하는 경우에 대하여 실시하였으며 그 결과는 다음과 같다.

표 2. 제어기의 계수 값.

Table 2. Parameters of the controller.

Parameters	Values
Reference model natural frequency ( $\omega_n$ )	22 rad/sec
Reference model damping ratio ( $\zeta$ )	3.5
Feedforward controller natural frequency ( $\omega_f$ )	2.7 rad/sec
Feedforward controller damping ratio ( $\zeta_f$ )	0.866
Proportional reaching rate constant ( $h$ )	30
Constant ( $\eta$ )	0.005
Width of boundary layer ( $\epsilon$ )	0.1

3.1 기준 입력 변화의 경우

첨단 질량 2인 경우에 대하여 기준 입력이 30°, 60° 및 90°일 때의 응답 결과를 그림 6~8에 보였다. 그림을 통하여 보면 로봇 팔 끝점의 진동이 허브가 목표 회전각에 도달하기 전에 대부분 소멸되어 끝점의 위치가 진동 없이 목표 회전각에 잘 도달함을 알 수 있다. 제안된 제어기가 선형 모델에 추종하도록 하기 때문에 응답 특성도 로봇 팔의 비선형성에도 불구하고 거의 선형적인 특성을 유지하고 있음을 알 수 있다

또한 제어 입력의 초기에 큰 진폭의 떨림은 시스템 파라미터 추정 과정에서 언급한 이상 응답 특성이 외란으로 작용하여 입력에 반영된 결과이며, 실험의 경우 입력의 크기가 수치 해석의 경우 보다 큰 것은 모델 안된 동역학에 의한 영향으로 판단된다.

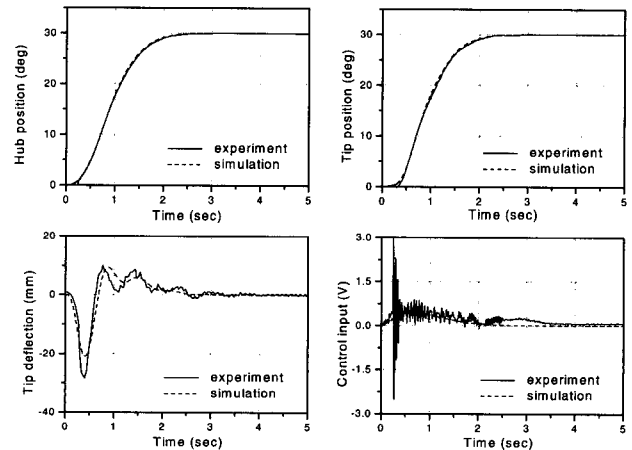


그림 6. 끝점 위치 제어 결과 (30° 계단 입력).

Fig. 6. Results of the tip position control (30° step input).

3.2 첨단 질량 변경의 경우

제안된 제어기의 시스템 파라미터 변화에 대한 강건성을 확인하기 위하여 첨단질량 2의 파라미터 값으로 설계된 제어기로 첨단 질량 4를 부착한 시스템을 30, 60 및 90° 제

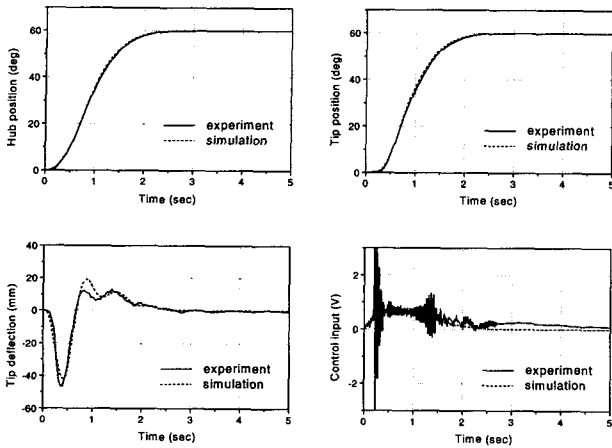


그림 7. 끝점 위치 제어 결과 (60° 계단 입력).  
Fig. 7. Results of the tip position control (60° step input).

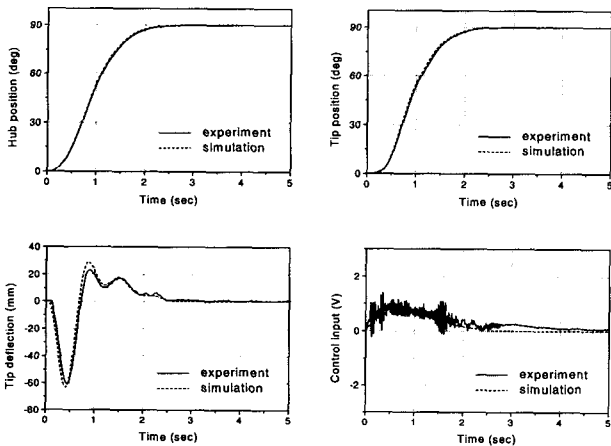


그림 8. 끝점 위치 제어 결과 (90° 계단 입력).  
Fig. 8. Results of the tip position control (90° step input).

어한 결과를 그림 9에 보였다.

실험 결과를 통하여 보면 첨단질량의 변경에 따른 파라미터 값의 변화에도 불구하고 진동 없이 목표 회전각에 도달함을 보이고 있다. 따라서 제안된 제어기는 시스템 파라미터의 변동에도 강건함을 알 수 있다.

**V. 결론**

미지의 첨단질량을 갖는 유연한 로봇 팔 시스템의 끝단 위치 제어를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 설계하기 쉽고 서보 시스템에 적용이 가능한 슬라이딩 모드를 가진 2-자유도 제어기를 제안하고, 수치 해석과 실험을 통하여 그 성능을 입증하였다.
- 2) 수치 해석과 실험을 통하여 제안된 제어기가 외란과 파라미터의 변화에 강건함을 보였다.
- 3) 로봇 팔 끝점의 위치 측정 센서로 비전 센서의 적용 가능성을 보였다.

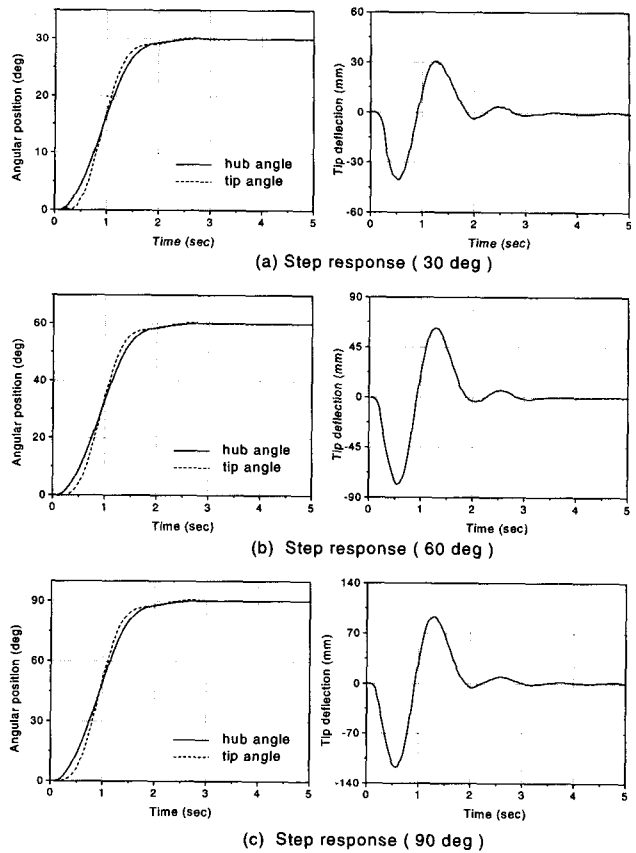


그림 9. 첨단질량 변화 시 계단 응답.  
Fig. 9. Step responses under tip mass variation.

**참고문헌**

- [1] R. H. Cannon, and E. Schmitz, "Initial experiments on end-point control of a flexible one-link robot," *Intl. J. of Robotics Research*, vol. 3, no. 3, pp. 62-75, Fall, 1984.
- [2] 하영균, 김승호, 이상조, 박영필, "유연한 단일링크 로봇 조작기의 최적귀환제어", 기계학회논문집, 11권 6호, pp. 923-934, 1987.
- [3] K. S. Yeung and Y. P. Chen, "Sliding-mode controller design of a single-link flexible manipulator under gravity," *J. of Control*, vol. 52, no. 1, pp. 101-117, 1990.
- [4] 신호필, 윤여산, 윤지섭, 강이석, "유연한 로봇팔의 진동제어", '96 자동제어 학술회의 논문집, pp. 229-232, 1996.
- [5] D. S. Kwon and W. J. Book, "A time domain inverse dynamics tracking control of a single-link flexible manipulator," *Trans. ASME J. of Dyn. Sys. Meas. and Con.*, vol. 116, pp. 193-200, 1994.
- [6] S. Yurkovich and F. E. Pacheco, "On controller tuning for a flexible-link manipulator with varying payload," *J. of Robotic Systems*, vol. 6, no. 3, pp. 233-254, 1989.
- [7] S. Yurkovich and A. P. Tzes, "Experiments in identification and control of flexible-link mani-

pulators," *IEEE Control Systems Magazine*, pp. 41-47, Feb. 1990.

[8] 박영욱, 김재원, 박영필, "유연한 단일링크 조작기의 적응진동제어", 한국소음진동학회지, 제5권 제3호, pp. 385-394, 1995.

[9] 신호필, 정영무, 강이석, "적응 입력다듬기를 이용한 유연한 조작기의 진동제어", 제어.자동화.시스템공학 논문지, 제5권 제2호, pp. 220-227, 1999.

[10] N. C. Singer and W. P. Seering, "Preshaping command inputs to reduce system vibration," *Trans. ASME J. of Dyn. Sys. Meas. and Con.*, vol. 112, pp. 76-82, May, 1990.

[11] 신호필, 이종광, 강이석, "비전 센서를 이용한 로봇 팔의 끝점 위치 측정", 제어.자동화.시스템공학 논문 투

고증.

[12] H. Elmali and N. Olgac, "Sliding mode control with perturbation estimation (SMCPE) : A new approach," *Int. J. of Control*, vol. 56, no. 4, pp. 923-941, 1992.

[13] Weibing Gao and James C. Hung, "Variable structure control of nonlinear systems : a new approach," *IEEE Trans on Industrial Electronics*, vol. 40, no. 1, pp. 45-55, 1993.

[14] K. Youcef-Toumi and S. T. Wu, "Input/output linearization using time delay control," *Trans. ASME J. Dyn. Sys. Meas. and Con.*, vol. 114, pp. 10-19, 1992.



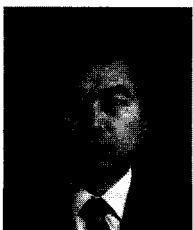
**강 이 석**

1974년 서울대 기계공학과 졸업. 1983년 아주대학교 기계공학과 석사. 1994년 한국과학기술원 기계공학과 박사. 1991~1992년 MIT대학 방문연구원. 1981~현재 충남대학교 기계설계공학과 교수. 주관심분야는 제어이론의 응용, 로봇틱스, 인공지능, 유압공학, 공장자동화.



**이 종 광**

1997년 충남대학교 기계설계공학과 졸업. 1999 동대학원 석사. 1999~현재 동 대학원 박사과정. 주관심분야는 진동제어, 로봇비전.



**신 효 필**

1977년 울산대학교 기계공학과 졸업. 1991년 충남대학교 기계설계공학과 석사. 2000년 동 대학원 박사. 1977~현재 국방과학연구소 재직중. 주관심분야는 로봇틱스, 제어이론의 응용, 유압 제어 공학.