大韓機械學會論文集 第19卷 第6號, pp. 1371~1381, 1995

〈論 文〉

슬라이딩모드와 압전필름 작동기를 이용한 단일링크 유연 머니퓰레이터의 강건위치제어

최 승 복*

(1994년 2월 21일 접수)

Robust Position Control of a Single-Link Flexible Manipulator Using Sliding Mode and Piezofilm Actuator

Seung-Bok Choi

Key Words : Flexible Manipulator(유연 머니퓰레이터), Sliding Mode Control(슬라이딩모드 제어), Piezofilm Actuator(압전필름 작동기), System Uncertainty(시스템 불확실성), Robust Position Control(강건위치제어)

Abstract

A novel hybrid control scheme to actively control the endpoint position of a very flexible single-link manipulator is proposed. The control scheme consists of a motor mounted at the beam hub and a piezofilm actuator bonded to the surface of the flexible link. The control torque of the motor to produce a desired motion is firstly determined by employing the sliding mode control theory on the equation of motion of the rigid link having the same mass as that of the proposed flexible link. The torque is then applied to the flexible manipulator in order to activate the commanded motion. During the motion, undesirable oscillation is actively suppressed by applying a feedback control voltage to the piezofilm actuator. Consequently, the imposed desired position is accomplished. In order to demonstrate high control performances accrued from the proposed method, computer simulations are undertaken by treating both regulating and tracking control problems.

기호설명

b : 링크(혹은 압전필름)의 폭
C : 압전필름의 커패스턴스
d_{31} : 압전 변형률상수
E_1 : 링크의 탄성계수
E_2 : 압전필름의 탄성계수
g_{31} : 압전 응력상수
h_1 : 링크의 두께
h_2 : 압전필름의 두께
I_1 : 링크의 관성모멘트
I_2 : 압전필름의 관성모멘트
I_H : 허브의 관성모멘트
I_t : 전체 관성모멘트
K_{31} : 압전필름의 커플링상수
L : 링크(혹은 압전필름)의 길이
M : 굽힘모멘트
T : 모터토크
T_k : 운동에너지
V : 제어전압
V_a : 비보존일

*정회원, 인하대학교 기계공학과

V_f : 압전필름 출력전압
V_{max} : 최대 적용전압
V_s : 포텐셜에너지
w : 탄성변형
y : 전체변위
y_a : 실제변위
y_d : 요구변위
y_e : 변위오차
θ : 각변위
$\dot{\theta}$: 각속도
$\ddot{\theta}$: 각가속도
θ_d : 요구 각변위
$\dot{\theta}_d$: 요구 각속도
$\ddot{\theta}_d$: 요구 각가속도
ρ_1 : 링크의 단위길이당 질량
ρ_2 : 압전필름의 단위길이당 질량

I. 서 론

로봇운동의 고속화, 선단위치의 정확도 향상, 에너지소모량 감소 등을 위한 방법의 일환으로 로봇 팔을 경량화하는 연구가 활발히 연구되고 있다. 로봇 팔을 경량화함으로써 많은 장점을 얻을 수 있으나 로봇 팔이 빠르게 운동할 때 선단위치를 정확히 측정하며 과도진동을 빠르게 억제하는 제어법칙이 필연적으로 요구된다. 이러한 제어법칙은 동적 모델링, 설계 및 제작과정 그리고 작업조건 등 다양한 조건들에 따른 고유진동수 및 감쇠계수와 같은 모델변수 변화에 강건해야 한다. 유연 로봇 팔을 효과적으로 그리고 강건하게 제어하기 위하여 다양한 접근방법이 시도되고 있다. 초기에는 최적제어기법[1~3]에 기초한 연구가 많이 발표되었으며, 최근 들어 시스템의 파라미터(parameter) 변동과 외란을 고려한 적응제어기법[4~5] 및 강건제어기법[6] 등이 제안되고 있고, 또한 슬라이딩모드 제어기법을 적용한 방법도 활발히 연구되고 있다.[7~9]

유연 로봇 팔을 제어하기 위해서 지금까지 제안된 대부분의 제어기들에 있어서, 로봇 팔 선단의 위치를 정확히 제어하기 위한 모터토크는 강체모드(rigid mode) 및 유한개의 탄성모드(elastic mode)를 동시에 고려하여 결정되었다. 그리고 무한차원의 연속시스템 제어를 위해 제어기 및 관측기 설계시 불가피하게 몇 개의 유한 진동모드만을 고려하였다. 이러한 경우, 충분한 유연모드를 고려하지 않거나 적절히 제어입력을 설정하지 못한다면 스필오버(spillover) 문제가 발생할 우려가 있다. 또한 상태변수의 정확한 예측이 필요하거나 강건제어를 위해 제어 알고리즘이 복잡해 지는 경우도 있다. 본 연구에서는 이러한 불가피성을 극복하기 위하여 유연링크 표면에 균일하게 접착된 분포형 압전필름 작동기와 감지기를 사용하여 탄성모드를 제어하고, 이와 함께 허브(hub)에 장착된 모터를 이용하여 강체모드를 제어하는 방법을 제안한다.

압전필름(혹은 polyvinylidene : PVDF)은 잘 알려진 바와 같이 압력을 가하면 전압이 발생하고, 반대로 전압이 가해지면 변형을 일으키는 특성을 갖고 있으며 유연한 보, 평판, 쉘(shell) 등의 구조물과의 우수한 상호 접착성을 갖고 있다. 압전필름은 이러한 특성과 유연성으로 인하여 유연 구조물의 진동특성을 감지하고 제어하는 감지기와 작동기로써의 역할을 용이하게 그리고 효과적으로 수행할 수 있다. 최근 유연한 구조물의 진동제어를 위해 압전필름을 이용한 연구가 활발하게 수행되어 오고 있으며 매우 우수한 제어효과도 이론적 해석 및 실험적 고찰을 통해 입증되었다.[10~12] 그러나, 유연 머니퓰레이터의 위치제어를 위해 압전필름을 적용한 연구는 드문 실정이다.

유연한 로봇 팔의 빠른 운동시 선단위치의 정확한 제어를 수행하기 위하여 본 연구에서 제안된 하이브리드(hybrid) 제어 알고리즘은 두 단계로 나눌 수 있다. 제1단계는 허브의 각도를 제어하기 위해 필요한 모터의 입력토크 결정이다. 입력토크를 결정하기 위하여 제어하고자 하는 유연링크와 동일한 질량을 갖는 강체링크 시스템을 고려하였다. 강체링크 시스템에 대하여 제어성능이 우수하고 시스템의 불확실성에 대하여 강건한 제어기법 중에 하나인 슬라이딩모드 제어기법을 적용하였다.[13] 이러한 방법으로 결정된 토크는 슬라이딩모드 조건이 만족하는 한 강체링크를 갖는 머니퓰레이터의 요구 선단운동을 보장한다. 요구선단운동을 얻기 위하여 슬라이딩모드 제어기법으로 얻어진 토크를 유연링크를 갖는 머니퓰레이터에 적용한다. 그러나 강체링크 운동방정식을 기초로 하여 결정된 모터토크의 적용으로 인하여 유연링크에 원치않는 진동이 발생하게 된다. 따라서, 제2단계로 유연 로봇 팔에서 실제로 측정된 선단위치와 요구선단위치와의 오차를 압전필름 작동기를 이용하여 초기부터 능동적으

로 제어하게 된다. 제어 알고리즘 구현에 요구되는 감지기로는 유연링크의 실제 탄성변위를 정확히 측정할 수 있는 압전 감지기와 허브각도 감지기가 필요하며 관측기의 설계는 필요 없다. 계산된 선단위치 오차신호를 미분하여 속도를 얻고 이를 바탕으로 고정 진폭제어기(constant-amplitude controller: CAC)를 설계하여 탄성변위를 완전히 제어함으로써 요구하는 선단위치를 얻는다. 되먹임(feedback) 전압은 균일하게 분포된 압전필름 작동기로 공급되기 때문에 선단위치에서 측정할 수 있는 모든 유연모드에 해당되는 제어입력이 공급된다. 그리고 제안된 형태의 제어기 사용으로 고유진동수 및 감쇠비 등의 시스템 변수변동시 되먹임 전압은 변수변동에 따른 선단위치 오차의 크기와 신호변화에 따라 그 공급형태가 자동적으로 바뀌게 되어 시스템의 강건성을 기대할 수 있다. 제안된 방법의 우수한 제어성능을 입증하기 위하여 유연 머니퓰레이터의 정착제어와 추적제어 문제를 설정하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다.

2. 동적 모델링

Fig. 1은 본 연구에서 제안된 단일링크 유연 머니퓰레이터를 나타낸다. 링크의 상하 표면에 접착된 압전필름은 각각 되먹임 전압에 의해 작동되는 분포형 작동기 역할과 모든 진동모드에 의해 발생되는 탄성변위를 측정하는 분포형 감지기의 역할을 수행한다. 제안된 유연 로봇 팔은 길이가 L이고

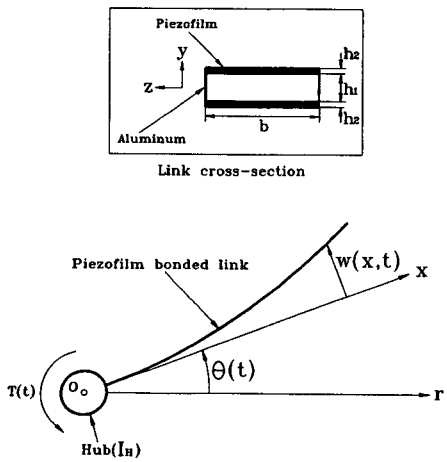


Fig. 1 A single-link flexible manipulator featuring surface-bonded piezofilms

연속적이며 기하적으로 일정한 형태를 갖도록 모델링 되었다. 좌표축 Or은 고정된 기준 좌표축이며, Ox는 허브에서의 보의 중립 축에 접선으로 설정된 좌표축이다. 따라서, 좌표축 Ox를 따라 거리 x만큼 떨어진 위치에서의 전체 변위는 허브의 각도 $\theta(t)$와 작은 탄성변위 $w(x, t)$의 합으로 결정되며 다음과 같다.

$$y(x, t)=w(x, t)+x\cdot\theta(t) \tag{1}$$

전압 $V(x, t)$에 의하여 작동기용 압전필름으로부터 발생되는 굽힘모멘트는 축방향에 대한 힘-평형관계로부터 중립 축에 대하여 구할 수 있으며, 그 결과는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}M=&\varepsilon_l(E_1h_1b+E_2h_2b)\{(E_1h_1^2+2E_1h_1h_2+E_2h_2^2)\\&/(2E_1h_1+2E_2h_2)-h_1/2-h_2\}+(\varepsilon_l-\varepsilon_p)\\&(h_1+h_2)E_2h_2b/2\\=&c\cdot V(x, t)\end{aligned} \tag{2}$$

여기서, ε_p는 전압공급시 압전필름에서 발생하는 변형률이고, ε_l은 이로 인하여 링크에 발생되는 합성변형률로서 각각 다음과 같이 주어진다.

$$\varepsilon_p=V(x, t)\cdot d_{31}/h_2 \tag{3}$$

$$\varepsilon_l=E_2h_2\varepsilon_p/(E_1h_1+2E_2h_2) \tag{4}$$

한편, 식(2)에서 c는 굽힘모멘트를 전압으로 나눈 것을 의미하며 제안된 링크의 기하학적 및 재료특성에 의하여 결정된다.

탄성변위와 각속도가 작다는 가정과 축방향 탄성변위를 무시하여 Euler-Bernoulli 보이론을 적용하면 다음과 같은 운동에너지와 위치에너지를 얻을 수 있다.

$$T_k=\frac{1}{2}\int_0^L\rho(\partial w(x, t)/\partial t+x\dot\theta(t))^2dx+\frac{1}{2}I_H\cdot\dot\theta^2(t) \tag{5}$$

$$V_s=\frac{1}{2}\int_0^L\frac{1}{EI}(EI\partial^2w(x, t)/\partial x^2-c\cdot V(x, t))^2dx \tag{6}$$

여기서, $\rho(\rho_1+\rho_2)$는 탄성링크 전체의 단위길이당 질량이며, $EI(=E_1I_1+E_2I_2)$는 링크 전체의 유효 굽힘강도이다. 비보존적인 외부토크 $T(t)$에 의한 일은 다음과 같이 주어진다.

$$V_a=-T(t)\cdot\theta(t) \tag{7}$$

따라서, 식(5)~(7)을 해밀톤의 법칙(Hamilton's

principle)에 적용하면 다음과 같은 편미방 형태의 지배방정식과 경계조건들을 얻을 수 있다.

$$\partial^2(EI\partial^2 y(x,t)/\partial x^2 - c\cdot V(x,t))/\partial x^2 + \rho\partial^2 y(x,t)/\partial t^2 = 0 \quad (8)$$

$$(EI\partial^2 y(x,t)/\partial x^2 - c\cdot V(x,t))|_{x=0} + T(t) - I_H\cdot\ddot{\theta}(t) = 0$$

$$y(x,t)|_{x=0} = 0$$

$$EI\partial^2 y(x,t)/\partial x^2|_{x=L} = c\cdot V(x,t)|_{x=L}$$

$$EI\partial^3 y(x,t)/\partial x^3|_{x=L} = c\cdot\partial V(x,t)/\partial x|_{x=L} \quad (9)$$

식(8)과 (9)에서 전압 $V(x,t)$는 시간의 함수로 정의되는 공급전압과 길이방향(x축 방향)의 함수로 정의되는 압전필름의 형상(폭)의 곱으로 나타낼 수 있다. 즉, $V(x,t)$는 링크에 굽힘모멘트를 발생시키는 등가전압 제어입력을 의미한다. 압전필름이 제안된 링크와 같이 x축에 대하여 기하적으로 일정한 형태를 갖고 있는 경우에 시간 t만의 함수인 $V(t)$로 간주할 수 있다. 이러한 가정 하에서 제어전압에 대한 공간 미분항을 소거하고 식(8)과 (9)를 다시 쓰면 다음과 같다.

$$EI\partial^4 y(x,t)/\partial x^4 + \rho\partial^2 y(x,t)\partial t^2 = 0 \quad (10)$$

$$(EI\partial^2 y(x,t)/\partial x^2 - c\cdot V(x,t))|_{x=0} + T(t) - I_H\cdot\ddot{\theta}(t) = 0$$

$$y(x,t)|_{x=0} = 0$$

$$EI\partial^2 y(x,t)/\partial x^2|_{x=L} = c\cdot V(t)$$

$$EI\partial^3 y(x,t)/\partial x^3|_{x=L} = 0 \quad (11)$$

식(10)과 (11)에서 알 수 있듯이 제어전압인 $V(t)$는 경계조건에만 포함되어 있으며, 따라서 이는 선형분포 시스템(linear distributed-parameter system)을 기술하고 있다.

압전필름 작동기와 연계된 제어기 $V(t)$는 모드생략(modal truncation)없이 분포형 모델 (10)과 (11)에 근거하여 다음 장에서 설계된다. 이것은 모든 진동모드에 대한 동시 제어의 가능성을 제공하는 것으로, 제어되지 않는 진동모드에 의한 제어스필오버 문제를 해결할 수 있는 가능성을 제공한다.

3. 제어기 설계

본 연구에서 제안된 제어기는 허브에 장착된 모터와 유연링크 표면에 접착된 분포형 압전필름 작동기로 구성된다. 제어의 첫단계는 허브의 각도를

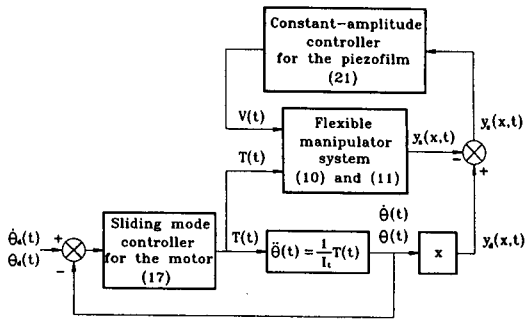


Fig. 2 A block-diagram of the proposed control algorithm

제어하기 위해 모터에 입력되는 토크의 결정이다. 제안된 유연링크와 동일한 질량을 갖는 강체 링크에 대하여 요구선단운동을 일으키는 토크를 결정하기 위해서 슬라이딩모드 제어기법을 적용하였다. 이러한 토크는 마치 외부에서 가해지는 외란토크와 같이 유연 머니퓰레이터에 적용된다. 따라서, 강체링크에 근거하여 결정된 토크를 유연 로봇 팔에 적용시 바람직하지 않은 진동이 발생하게 되며, 분포형 압전필름 작동기를 사용하여 능동적으로 이러한 진동을 제어함으로써 요구되는 선단운동을 얻게 된다. Fig. 2는 이상의 제어 알고리즘을 설명하는 블록선도(block-diagram)를 나타낸다. 블록선도로부터 요구변위 $y_d(x,t)$혹은 $\theta_d(t)$가 슬라이딩모드 제어기에 의해 보장된다면 다음단계의 제어는 유연 머니퓰레이터 시스템 (10)과 (11)에서 발생하는 실제변위 $y_a(x,t)$와 요구변위의 차인 오차변위 $y_e(x,t)$를 능동적으로 완전히 억제하는 것임을 알 수 있다.

3.1 슬라이딩모드 제어기

먼저 시스템의 요구위치를 보장하는 모터토크를 결정하기 위해 슬라이딩모드 제어기를 다음과 같이 설계한다. 유연링크와 동일한 크기의 질량을 갖는 강체링크 머니퓰레이터의 운동방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix}\dot{\theta}(t)\\ \ddot{\theta}(t)\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}0 & 1\\ 0 & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\theta(t)\\ \dot{\theta}(t)\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}0\\ \frac{1}{I_t}\end{bmatrix}T(t) + \begin{bmatrix}0\\ 1\end{bmatrix}d(t) \quad (12)$$

$$\theta(t_0) = \theta_0,\ \dot{\theta}(t_0) = \dot{\theta}_0$$

여기서, θ_0와 $\dot{\theta}_0$는 초기시간 t_0에 주어지는 초기조건이고, $d(t)$는 미지의 외란토크이며, $|d(t)| \le \varepsilon$

으로 그 크기가 한정되어 있다고 가정한다. 즉, 제어기는 임의의 초기조건에 대하여 추적오차를 점근적으로 영(zero)에 보내야 한다. 따라서 오차를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$e_{m1}(t)=\theta_d(t)-\theta(t)$$
$$e_{m2}(t)=\dot{\theta}_d(t)-\dot{\theta}(t) \tag{13}$$

식(13)으로 정의되는 오차 상태공간에서 시간변화 슬라이딩 서피스를 다음과 같이 설정할 수 있다.

(i) $t=t_0$

$$s_m(t_0)=c(t_0)e_{m1}(t_0)+e_{m2}(t_0)+a(t_0)$$

(ii) $t_0<t\leq t_s$

$$s_m(t)=c(t)e_{m1}(t)+e_{m2}(t)+a(t)$$

(iii) $t>t_s$

$$s_m(t)=c_pe_{m1}(t)+e_{m2}(t) \tag{14}$$

여기서, t_s는 슬라이딩모드 운동이 일어나기 시작하는 시간이며, $c(t)$와 $a(t)$는 각각 시간에 따라 변하는 슬라이딩 서피스 (14)의 기울기와 $e_{m2}(t)$축의 절편을 나타내고, c_p는 미리 정해진 슬라이딩 서피스의 기울기이다. 슬라이딩 서피스 (14)의 구체적인 이동 알고리즘과 중요 특성은 참고문헌[13]에 잘 기술되어 있어 여기서는 생략한다.

식(14)에서 설정한 슬라이딩 서피스를 따라 미끄러지는 오차궤적을 발생시키기 위한 제어토크가 존재한다면 추적오차는 점근적으로 영이 된다는 것을 증명할 수 있다. 이 증명은 아래와 같은 슬라이딩 조건을 만족함으로써 얻어진다.

$$s_m(t)\,\dot{s}_m(t)<0 \tag{15}$$

이 조건을 만족시키기 위해 등가 제어법칙으로부터 다음과 같은 불연속 제어기를 설계할 수 있다.[14]

$$T(t)=I_t\{c(t)(\dot{\theta}_d(t)-\dot{\theta}(t))+\ddot{\theta}_d(t)+k\,sgn(s_m(t))\},\quad k>\varepsilon \tag{16}$$

여기서, k는 불연속 제어 게인(gain)이다. 실제적인 제어기 구현에 있어서 불연속 제어기 (16)은 채터링(chattering)을 유발하여 하드웨어에 악영향을 끼치므로 바람직하지 않다. 이러한 문제의 해결을 위하여 정해진 경계영역내에서 불연속 제어기를 연속 제어기로 근사화할 수 있다. 즉, 식(16)의 비선형함수인 부호함수를 포화함수로 대치하여 다음과 같은 연속 제어기를 사용할 수 있다.[15]

$$T(t)=I_t\{c(t)(\dot{\theta}_d(t)-\dot{\theta}(t))+\ddot{\theta}_d(t)+k\,sat(s_m(t))\} \tag{17}$$

$$sat(s_m(t))=\begin{cases}s_m(t)/\Delta_f, & |s_m(t)|\leq\Delta_f\\ sgn(s_m(t)), & |s_m(t)|>\Delta_f\end{cases}$$

Δ_f : boundary layer width

3.2 고정 진폭제어기

제안된 제어 알고리즘의 다음단계는 작동기용 압전필름에 제어전압 $V(t)$를 적용시킴으로써, 분포형 시스템 (10)과 (11)에서 나타나는 바람직하지 않은 오차변위 $y_e(x,t)$를 능동적으로 제어하는 것이다. 이러한 제어 알고리즘이 적용되면 실제변위 $y_a(x,t)$는 요구변위 $y_d(x,t)$와 같게 되며 이로 부터 $x=L$일 때의 요구선단운동을 얻을 수 있다. 일반성의 결여없이, 제어전압 $V(t)$의 크기에는 실제적인 한계가 있음을 가정한다(즉, $|V(t)|\leq V_{max}$). 압전필름 작동기에 대한 제어기 $V(t)$를 설계하기 위하여 리아프노프 안정성(Lyapunov stability) 이론을 도입하였다. 모터토크 적용시 유연 링크의 진동으로 인하여 발생된 오차변위의 운동에너지와 위치에너지로 이루어진 양의 리아프노프함수(positive definite Lyapunov functional)를 다음과 같이 설정할 수 있다.

$$F=\frac{1}{2}\int_0^L\{(\partial^2y_e(x,t)/\partial x^2)^2+(\partial y_e(x,t)/\partial t)^2\}dx \tag{18}$$

이러한 함수의 시간미분을 최소화함으로써 시스템을 평형상태로 만들어 진동제어를 수행한다는 개념 하에 먼저 미분을 취하면 다음과 같다.

$$\partial F/\partial t=\int_0^L\{(\partial^2y_e(x,t)/\partial x^2)\cdot(\partial^3y_e(x,t)/\partial x^2\partial t)+(\partial y_e(x,t)/\partial t)\cdot(\partial^2y_e(x,t)/\partial t^2)\}dx \tag{19}$$

식(10)과 식(11)을 식(19)에 대입하고 부분적분법을 적용하면 다음과 같이 전개된다.

$$\begin{aligned}\partial F/\partial t=&\int_0^L\{(1-EI/\rho)(\partial^2y_e(x,t)/\partial x^2)(\partial^3y_e(x,t)/\partial x^2\partial t)\}dx\\&-\int_0^L\{x\ddot{\theta}_d(t)\cdot\partial y_e(x,t)/\partial t\}dx\\&+\{c\cdot V(t)\partial^2w(x,t)/\partial t\partial x|_{x=L}\}/\rho\\&+\{(T(t)-I_H\cdot\ddot{\theta}(t))(\partial^2y_e(x,t)/\partial t\partial x)|_{x=0}\}/\rho\end{aligned} \tag{20}$$

따라서, 식(20)에서 세 번째 항이 항상 음

(negative)이 되도록 제어전압 $V(t)$를 설계해야 됨을 알 수 있다. 이러한 조건을 만족하는 제어기는 여러형태가 있으며, 여기서는 Bailey와 Hubbard 등[12]이 이용한 고정 진폭제어기(CAC)를 다음과 같이 선택한다.

$$V(t)=-K\cdot sgn(c\cdot \dot{V}_f(t)) \tag{21}$$

여기서, K는 제어게인이며 $\dot{V}_f$은 유연링크 표면에 접착된 분포형 압전필름 감지기로부터 나오는 출력신호전압 V_f의 시간미분이다. 제어게인 K는 제어전압의 크기를 나타내며 적용되는 압전필름 작동기와 적용되는 유연링크의 기계적 및 물리적 성질에 따라 결정되는 일종의 물리적인 값으로 일반적 선형 제어기에서와 같이 요구되는 폐회로 극점에 따라 논리적으로 결정하기는 매우 어렵다. 따라서 고정된 압전필름 작동기 및 유연링크의 기계적 및 물리적 특성과 함께 진동의 크기를 변화시켜 가면서 여러 번의 시뮬레이션을 수행하여 알맞게 결정한다.

압전필름 감지기로부터의 출력전압은 필름의 모든 부분에서 생성된 전하를 전체길이에 대하여 적분함으로써 얻어지며, 제안된 유연링크에 대하여 생성되는 출력신호 전압은 다음과 같다.

$$V_f(t)=(K_{31}^2 Db\partial w(x,t)/\partial x|_{x=L})/Cg_{31} \tag{22}$$

여기서, D는 압전필름 감지기의 밑면으로부터 중립축까지의 거리로서 다음과 같다.

$$D=(h_1+2h_2)/2 \tag{23}$$

출력전압 V_f와 탄성변위 사이의 관계는 식 (22)에 의하여 정립될 수 있으며, 또한 압전필름 감지기가 모든 진동모드에 의한 탄성변위를 측정하므로 측정 불가능한 진동모드와 연계된 관측기 스필오버 문제를 피할 수 있는 가능성을 제공한다. Fig. 2에서 실제변위 $y_a(x,t)$는 모터에 장착된 엔코더(encoder)에 의하여 관측되는 각변위와 분포형 압전필름 감지기에 의하여 관측되는 탄성변위를 합산하여 얻어진다. 따라서, 제안된 제어 알고리즘 실현에 있어서는 상태 관측기를 도입할 필요가 없다. 감지용 압전필름에서 나오는 출력신호는 식(22)에서 보는 바와 같이 편미방형태로 유도되었으며 이는 유연링크의 모든 부위에서 발생하는 각 신호가 합산되어 출력한다는 것을 의미한다. 다시 말하여, 첫번째 모드와 두번째 모드 또는 그 이상의 모드가 동시에 작동되었을 때 각 파형의 기여도에 따른 신호가 합산된 출력전압으로 표현되는 것이다. 그리고 이러한 출력신호에 대한 정보를 바탕으로 분포형 압전필름 작동기 (21)이 설정되어 모드 생략 없이 각 모드의 기여도와 주파수 특성에 알맞는 되먹임 전압이 공급된다.

제안된 제어 알고리즘은 설계과정에 있어서 큰 어려움이 없고 간단하므로 실제 실행에 있어서도 수월할 것으로 예상되며, 제어의 실행에 필요한 비용도 상대적으로 적어질 것이다. 더 나아가 고유진동수와 같은 시스템의 모델변수에 대한 정확한 정보가 필요 없다. 예를 들어, 외란토크가 존재하며 변화하는 선단하중 같은 요인에 의해 모델변수 변동(실제적인 불확실성)이 발생한다고 가정한다면, 실제변위 $y_a(x,t)$와 오차 $y_e(x,t)$가 변화할 것이다. 이러한 경우에 제안된 제어 알고리즘에서는 외란의 크기를 고려한 슬라이딩모드 제어기의 토크가 모터에 적용될 것이고, 오차 $y_e(x,t)$를 능동적으로 억제하기 위하여 압전필름 작동기에 가해지는 제어전압이 모델변수 변화에 따라 능동적으로 변화할 것이다. 그러므로 제안된 제어 알고리즘은 압전필름 작동기의 실제적인 한계 내에서 외란 토크 및 모델변수의 불확실성이 존재하더라도 알고리즘의 특정한 변경없이 성공적인 진동제어를 수행해 낼 수 있는 장점이 기대된다.

4. 시뮬레이션 결과 및 고찰

제안된 하이브리드 제어 알고리즘의 우수한 제어성능을 입증하기 위하여 Table 1에 주어진 기하학적 및 물리적 특성을 갖는 단일링크 탄성 팔을 고려하였다. 제안된 제어기는 비교적 간단한 방법으로 설계되며 모드 생략없이 실제 구현이 가능하나 본 연구에서는 컴퓨터 시뮬레이션만을 수행하였기 때문에 모드해석(modal analysis)을 통하여 시스템 변수를 도출하였다. Lagrange 방정식을 적용하여 상태방정식을 얻었으며,[2] 제어기 설계에 있어서 모든 상태변수가 측정가능하다고 가정하였다. 주어진 탄성 팔의 제원과 연계하여 각 진동모드가 시스템 응답에 얼마나 영향을 미치는 가를 면밀히 검토한 후, 주제어모드로서 강체모드와 두개의 탄성모드(제1차 및 제2차 모드)를 고려하여 시뮬레이션 모델을 설정하였다. 압전필름이 부착되지 않은 경우 탄성 팔의 제1차 모드 및 제2차 모드의 고유진

Table 1 Dimensional and mechanical properties of the aluminum link and piezofilm

Aluminum link				
Young's modulus (E_1)	Thickness (h_1)	Density (ρ_1)	Width (b)	Length (L)
64 GPa	1.00 mm	1650 kg/m^3	66.0 mm	1.13 m
Moment of inertia of the Hub		0.023 kgm^2		
Piezofilm				
Youg's modulus (E_2)	Thickness (h_2)	Density (ρ_2)	Width (b)	Length (L)
2 GPa	0.052 mm	1780 kg/m^3	66.0 mm	1.13 m
Maximum operating voltage		1560 V		
Piezoelectric strain constant (d_{31})		$23\times10^{-12}\frac{\text{m/m}}{\text{V/m}}$		
Piezoelectric stress constant (g_{31})		$216\times10^{-3}\frac{\text{V/m}}{\text{N/m}^2}$		

동수는 각각 1.26 Hz 와 4.08 Hz로 계산되었고, 부착된 압전필름을 고려한 경우의 고유주파수는 각각 1.18 Hz 와 3.98 Hz로 계산되어 압전필름이 모델변수에 얼마나 영향을 미치는 가를 알 수 있다. 한편, 유연모드와 연계된 탄성 팔의 구조적 댐핑특성을 주기위해 두 유연모드에 각각 0.02의 감쇠비(damping ratio)를 부가하였다.

Fig. 3은 압전필름 작동기에 제어전압을 가하지 않고, 유연링크 선단이 20 cm 위치에 정착하도록 슬라이딩모드 제어기로부터 얻어진 토크를 모터에 입력하였을 때 시스템의 정착제어 응답을 나타낸다. Fig. 3(a)에서 보는 바와 같이 강체링크의 경우 요구 각위치 ($\theta_d(t)$)는 Fig. 3(c)에 나타난 슬라이딩모드 제어토크를 적용함으로써 정확히 얻어질 수 있다. 그러나, 이 제어토크를 유연링크 머니퓰레이터에 적용함으로써 바람직하지 않은 진동이 발생하며, 오직 가정된 유연모드의 감쇠비에 의해 진동의 크기가 감소하는 것을 Fig. 3(b)에서 확인할 수 있다. Fig. 4는 Fig. 3에서와 동일한 모터토크 공급과 압전필름 작동기에 제어전압을 공급하였을 때 시스템의 제어응답이다. 여기서 CAC의 제어게인 K는 100으로 설정하였다. 이는 다시 말하여 한계 공급전압이 100V로 설정되었음을 의미한다. 한편, 이때 요구되는 전류는 공급전압을 유지시키기 위한 최소한의 크기면 충분하며 수 $\mu A/cm^2$ 수준이다. 제안된 하이브리드 제어 알고리즘의 사용으로 작은 오버슈트(overshoot)와 잔여진동없이 유

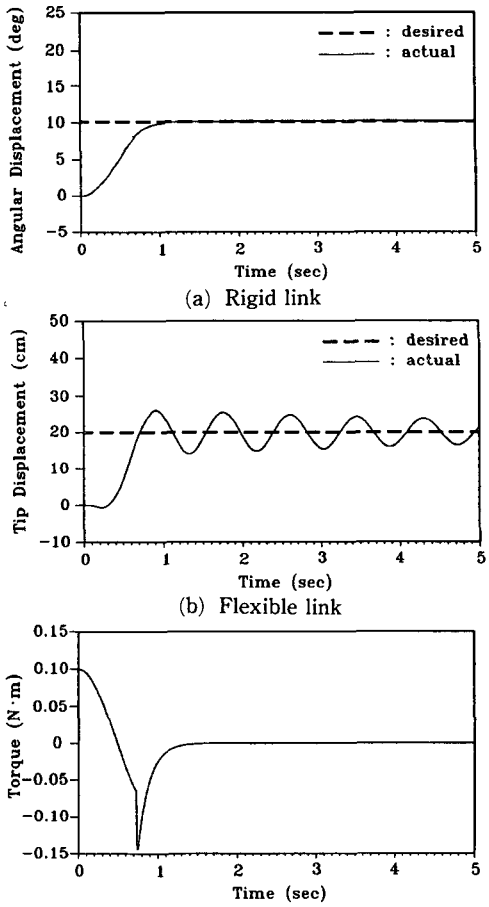
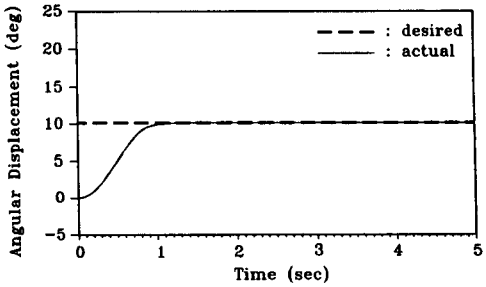


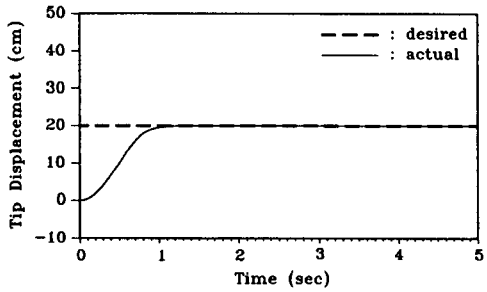
Fig. 3 Regulating responses in the absence of uncertainties : without feedback

연링크의 선단이 요구위치에 빨리 도달되는 우수한 정착제어가 수행되었음을 알 수 있다. 로봇 팔의 운동 초기에 Fig. 3(b)에서 관측되었던 비최소위상(nonminimum phase) 특성 또한 완전히 제거되었다. 여기에 사용된 압전필름의 최대 작동전압은 1560 V로 제어영역(bandwidth)이 매우 크며 작동 시간지연(actuation time delay) 현상이 거의 없기 때문에 Fig. 4(c)에 주어진 제어전압 궤적은 쉽게 구현될 수 있다. 여기서 나타나는 뱅뱅형태(bang-bang type)의 제어입력은 3절 후반부에서 설명한 것과 같이 분포형 감지기에 의해 감지되는 모든 모드에 따라 적절히 결정되므로 3차 이상의 모드를 가진 시키지는 않는다. 만일 적은 크기의 진동에 대하여 매우 진폭이 큰 뱅뱅형태의 전압이 입력되면 역 진동이 발생될 우려도 있으나 일정 게인제어기 및 일정 진폭게인제어기를 혼합한 형태의 하이브리드 제어기의 사용으로 제거할 수 있다.[16]

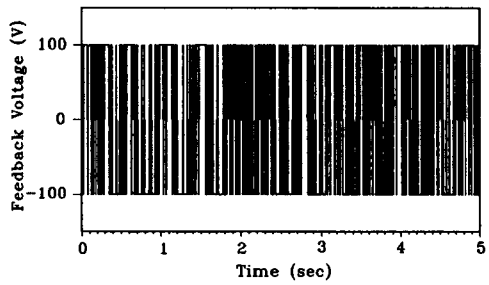
다음은 제안된 하이브리드 제어 알고리즘의 강건성을 입증하기 위하여 시스템의 불확실성을 부가하였다. 토크외란은 $0.5I_t\sin(7t)$ Nm를 부가하였으며, 고유주파수와 감쇠비를 각각 10% 감소시켜 모델 파라미터 변화를 부가하였다. 첫번째 고유진동수의 10% 감소는 탄성 팔 질량의 약 38%에 상당하는 선단 질량이 존재하는 것과 같은 부하조건이다. Fig. 5는 이와 같은 불확실성이 부가되었을 때 정착제어 응답을 나타낸다. 제어성능의 특징은 Fig. 3과 Fig. 4에서 고찰된 것과 유사하며, 부가된



(a) Rigid link

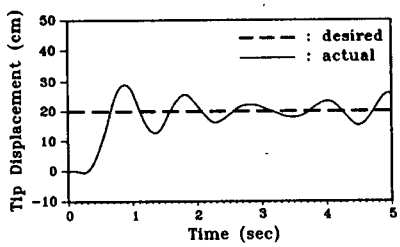


(b) Flexible link

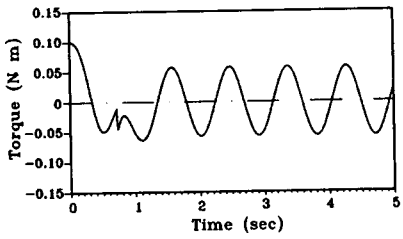


(c) Input voltage history

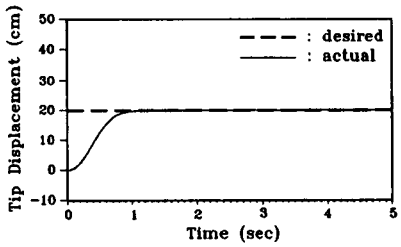
Fig. 4 Regulating responses in the absence of uncertainties ; with feedback



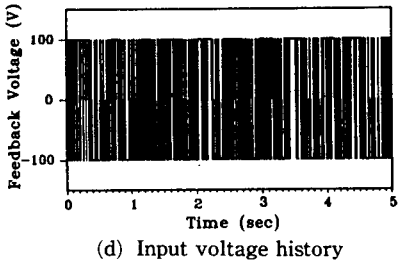
(a) Flexible link : without feedback



(c) Motor torque



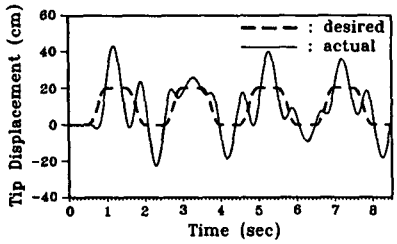
(b) Flexible link : with feedback



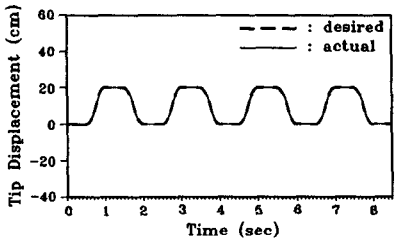
(d) Input voltage history

Fig. 5 Regulating responses in the presence of uncertainties

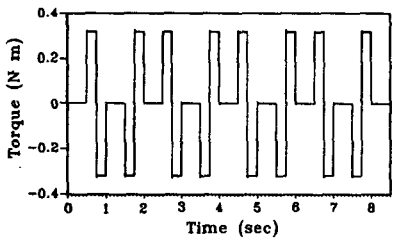
외란의 크기를 슬라이딩모드 제어기 설계시 고려하였기 때문에 모터에 입력되는 토크의 크기가 Fig. 3(c)와 매우 다름을 알 수 있다. 한편, 불확실성 존재 시에도 압전필름 감지기로부터 유연 로봇 팔의 탄성변위를 정확히 측정할 수 있으므로 제안된 제어 알고리즘에 의해 압전필름 작동기에 알맞는 전압이 공급된다. 물론, 이 제어전압의 형태는 Fig. 4(c)에서 공급된 입력전압 궤적과는 다름을 알 수 있다. 제안된 방법은 유연링크 머니퓰레이터의 추적제어에도 확장 적용할 수 있다. 요구궤적을 설정하기 위하여 단순히 반복되는 왕복 작업을 고려하였다. 유연링크가 요구위치(20 cm)에 도달한 후 0.5초간 거주하고 다시 초기 위치(0 cm)로 되돌아가는 반복운동을 하도록 요구 궤적을 설정하였다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 제어 입력 전압이 공급되지 않을 경우 유연링크에 바람직하지 않은 진동이 발생한다. 그러나, 제안된 하이브리드 제어 알고리즘의 적용으로 짧은 거주 시간에도 불구하고 대단히 우수한 추적제어가 가능함을 확인할 수 있다. Fig. 7은 Fig. 5에서 부가한 동일한 불확



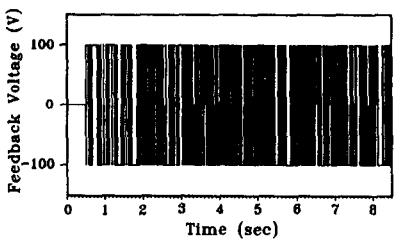
(a) Flexible link : without feedback



(b) Flexible link : with feedback

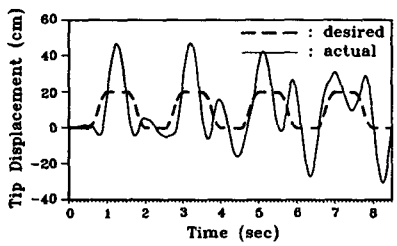


(c) Motor torque

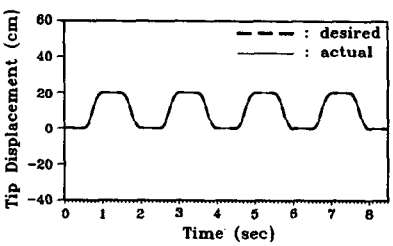


(d) Input voltage history

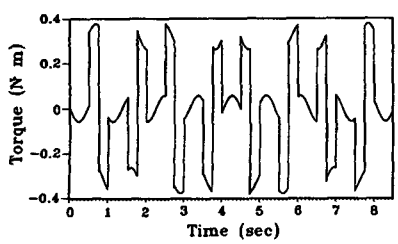
Fig. 6 Tracking responses in the absence of uncertainties



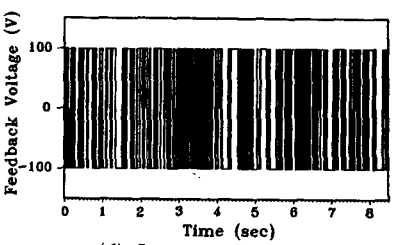
(a) Flexible link : without feedback



(b) Flexible link : with feedback



(c) Motor torque



(d) Input voltage history

Fig. 7 Tracking responses in the presence of uncertainties

실성이 존재할 경우 유연링크의 추적 성능을 나타낸 것으로 제안된 제어기의 사용으로 강건한 추적 제어가 가능함을 입증한다.

5. 결 론

단일링크 유연 로봇 팔의 선단위치제어를 위해 두 가지 작동기를 갖는 새로운 제어 알고리즘을 제안하였다. 유연링크와 동일한 질량을 갖는 강체 링크에 대하여 슬라이딩모드 제어기법을 적용함으로써 강체링크의 요구선단운동을 일으키는 모터토크 입력을 결정하였으며, 로봇운동시 원치않는 진동억제를 위하여 리아프노프 안정성으로부터 압전필름 작동기에 공급되는 제어입력전압을 결정하였다. 제안된 하이브리드 제어 알고리즘은 유연 로봇 팔의 위치제어를 위해 모터토크에만 의존하는 기존의 제어기법에 비하여 구성 및 설계가 매우 간단하여 실제 적용이 보다 용이할 것으로 기대된다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 그 제어성능이 매우 우수하며 외란과 모델변수 변동과 같은 시스템의 불확실성 존재시에도 효과적인 강건제어가 가능함을 보였다. 이에 대한 실험적 고찰과 입증이 본 연구의 계속 연구로 진행 중에 있다.

후 기

본 연구의 일부는 1994년도 교육부 학술연구조성비(기계공학 : ME94-D-11)에 의하여 수행되었으며, 이에 관계자께 감사드립니다.

참고문헌

(1) Hastings, G. G. and Book, W. J., 1985, "Experiments in Optimal Control of a Flexible Arm," *Proceedings of American Control Conference,* Boston, MA, pp. 728~729.

(2) Schmitz, E., 1985, "Experiments on the Endpoint Position Control of a Very Flexible One-Link Manipulator," *Ph. D Thesis,* Dept. of Aeronautics and Astronautics, Stanford University.

(3) Sakawa, Y., Matsno, F., and Fukushima, S., 1985, "Modeling and Feedback Control of a Flexible Arm," *Journal of Robotic Systems,* Vol. 2, No. 4, pp. 453~472.

(4) Yuan, B. S., and Book, W. J., 1987, "A Robust Scheme for Direct Adaptive Control of Flexible Arms," *Proceedings of the ASME Winter Annual Meeting,* Vol. 6, pp. 261~268.

(5) Clarke, D. W., Mohtadi, C. and Tuffs, P. S., 1987, "Generalized Predictive Control-Part I : The Basic Algorithm," *Automatica,* Vol. 23, No. 2, pp. 137~148.

(6) Choi, S. B., Cheong, C. C., Thompson, B. S. and Gandhi, M. V., 1993, "Vibration Control Robust to Parameter Variations in a Very Flexible Manipulator Fabricated from Composite Laminates," *Journal of Sound and Vibration,* Vol. 162, No. 2, pp. 195~207.

(7) Yeung, K. S., and Chen, Y. P., 1990, "Sliding Mode Controller Design of a Single-Link Manipulator under Gravity," *International Journal of Control,* Vol. 52, No. 1, pp. 101~117.

(8) Qian, W. T., and Ma, C. C. H., 1992, "A New Controller Design Using for Flexible One-Link Manipulator," *IEEE Transactions on Automatic Control,* Vol. 37, No. 1, pp. 132~137.

(9) Choi, S. B., Cheong, C. C. and Shin, H. C., 1995, "Sliding Mode Control of Vibration in a Single-Link Flexible Arm with Parameter Variations," *Journal of Sound and Vibration,* Vol. 179, No. 5, pp. 737~748.

(10) Gandhi, M. V. and Thompson, B. S., 1992, *Smart Materials and Structures,* Chapman & Hall, London.

(11) Choi, S. B., Cheong, C. C., Thompson, B. S., and Gandhi, M. V., 1994, "Vibration Control of Flexible Linkage Mechanisms Using Piezoelectric Films," *Mechanism and Machine Theory,* Vol. 29, No. 4, pp. 535~546.

(12) Bailey, T. and Hubbard, Jr., J. E., 1985, "Distributed Piezoelectric-Polymer Active Vibration Control of a Cantilever Beam," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics,* Vol. 8, No. 5, pp. 605~611.

(13) Choi, S. B., Cheong, C. C., and Park, D. W., 1993, "Moving Switching Surfaces for Robust Control of Second-Order Variable Structure Systems," *International Journal of Control,* Vol.

58, No. 1, pp. 229~245.

(14) Utkin, V. I., 1977, "Variable Structure Systems with Sliding Modes," *IEEE Transactions on Automatic Control,* Vol. 22, No. 2, pp. 212~222.

(15) Slotine, J. J., and Sastry, S. S., 1983, "Tracking Control of Non-Linear Systems Using Sliding Surfaces, with Application to Robot Manipulators," *International Journal of Control,* Vol. 38, No. 2, pp. 456~492.

(16) Choi, S. B., Cheong, C. C., and Kim, S. H., 1994, "Vibration Control of a Composite Beam Using a Distributed Piezofilm Actuator and Sensor," *Proceedings of American Control Conference,* Vol. 3, pp. 2590~2594.