한국정밀공학회지 제 17 권 제 11 호 (2000 년 11 월)
Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 17, No. 11, November 2000.

압전 작동기 및 감지기를 이용한 유연한 2 링크 로봇팔의 위치 및 진동제어

신호철*, 최승복**, 김승호*

Position and Vibration Control of Flexible 2-Link Robot Arm Using Piezoelectric Actuators and Sensors

Ho Cheol Shin*, Seung Bok Choi**, and Seung Ho Kim*

ABSTRACT

This paper presents a hybrid actuator scheme to actively control the end-point position and vibration of a two-link flexible robot arm. Control scheme consists of four different actuators; two servo-motors at the hubs and two piezoceramics bonded to the surfaces of the flexible links. Two sliding hyperplanes are designed for two servo-motors which have time varying parameters to maintain control performance in any configuration. The surface gradients of the hyperplanes are determined by pole assignment technique to guarantee the stability on the hyperplanes themselves. During the motion, undesirable oscillations caused by the torques based on the rigid link dynamics are actively suppressed by applying feedback control voltages to the piezoceramic actuators. Consequently, desired tip motion is achieved. In order to demonstrate the effectiveness of the proposed methodology, experiments are performed for the regulating and tracking control problems.

Key Words : Flexible Robot Arm(유연 로봇 팔) , Piezoelectric Actuator(압전작동기), Position Control(위치제어), Vibration Control(진동제어), Sliding Mode Control(슬라이딩모드제어)

1. 서론

현재 사용되고 있는 대부분의 로봇은 기계적 강성으로 인한 구조적 진동을 최소화 하기 위하여 큰 부피와 무게를 갖도록 설계되었다. 이들 로봇의 큰 부피와 무게는 로봇의 운전 속도를 느리게 하고, 에너지 소모량을 크게 하며 가반 중량을 작게 만들어 성능 저하를 초래한다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 일환으로 로봇 팔을 경량화하는 연구가 매우 활발하게 진행되고 있다 [1]. 링크가 모두 유연한 다관절 로봇은 서로 다른 링크들의 일반화 좌표들사이에 비선형 연계항들이 매우 많기 때문에 대부분의 연구들이 단일 링크 유연 로봇에 집중되어 왔다 [2,3]. 그러나 단일 링크 로봇만으로 충분히 수행될 수 있는 작업은 거의 없기 때문에 현재 산업용 강체 로봇들은 대부분 다관절 로봇으로 이루어져 있다. 따라서 유연 로봇도 다관절 유연 로봇에 대한 연구의 필요성이 대두되어 최근에 다관절 유연 로봇에 대한 연구가 수행되고 있으나 대부분 이론적인 연구나 컴퓨터 모의실험을 수행한 연구이며 실험을 수행한 연구는 소수이다 [4,5]. 또한 탄성 로봇 팔의 진동을 억제하기 위

* 한국원자력연구소
** 인하대학교 기계공학과

해 지금까지 제안된 대부분의 제어기들은 모터에 입력되는 토크를 결정하는데 있어서 강체모드(rigid mode) 및 유한 개의 탄성모드(elastic mode)를 동시에 고려하기 때문에 제어기의 실제 구현에 있어서 하드웨어의 신호잡음(signal noise)등과 연계되어 정확한 토크의 입력이 용이하지 않았다. 이러한 문제점은 지능재료를 사용하여 개선할 수 있다. 최근 유연 구조물의 진동 제어를 위해 지능재료를 이용한 연구가 많이 수행되고 있으며, 이론적 해석 및 실험적 고찰을 통하여 매우 우수한 제어효과가 입증되고 있다 [6]. 또한 몇몇 연구가들이 유연 로봇에 분포형 압전감지기와 작동기를 적용하여 제어를 수행하였다 [7,8].

본 연구에서는 참고문헌 [8]의 확장연구로, 유연성으로 인하여 유연한 보, 평판, 쉘(shell) 등의 구조물과 접착성이 우수하며 유연 구조물의 진동특성을 용이하게 감지해 낼 수 있는 압전필름을 유연 링크의 진동특성을 감지하는 감지기로, 작동기로써 요구되는 입력전압이 압전필름보다 훨씬 적으면서도 매우 큰 힘을 발생시키는 압전세라믹을 유연 링크의 진동을 억제하는 작동기로 2 링크 유연 로봇 팔에 적용하였다. 목표 각운동을 얻기 위한 서보 모터의 제어토크는 제안된 2 링크 유연로봇 팔과 등가의 질량을 갖는 강체 2 링크 로봇 팔의 운동방정식으로부터 구하였다. 토크 외란이 존재하는 서보모터의 강건한 제어 토크를 결정하기 위하여 피이드포워드 보상과 연계한 슬라이딩 모드제어 시스템을 설계하였으며 압전작동기와 연계한 제어기는 Lyapunov 안정성 이론에 근거하여 설계하였다. 제안된 제어 방법의 효과적인 성능을 입증하기 위하여 실험적으로 정착 및 추적 제어을 수행하였다.

2. 시스템 모델링

2.1 시스템 구성

본 연구에서는 표면에 접착된 압전세라믹과 압전필름을 특징으로하며 수평면에서 운동하는 2 링크 유연 로봇 팔을 Fig. 1 과 같이 제안한다. 양쪽 면에 접착된 압전세라믹과 압전필름은 각각 작동기와 감지기 역할을 수행한다. 두개의 링크는 평면 운동중에 횡방향으로만 유연하다고 가정한다. Fig. 1 에서 $w_i(x_i,t)$ 는 i 번째 링크의 좌표축 O_iX_i 을 따라 거리 x 만큼 떨어진 곳에서 발생하

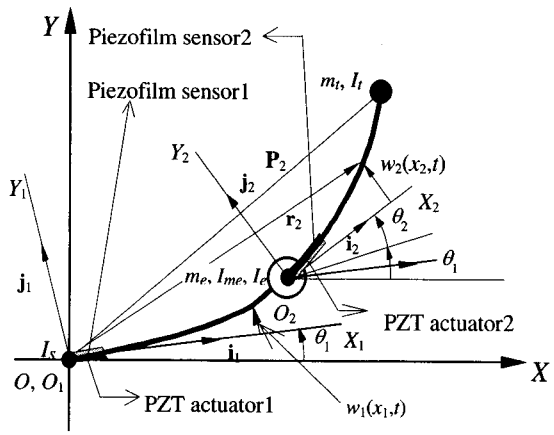

Fig. 1 A two-link flexible manipulator using piezo actuators and sensors

는 탄성변형을 나타내며, 모드가정법(assumed mode method)으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$w_i(x_i,t)=\sum_{j=1}^{\infty}\phi_{ij}(x_i)q_{ij}(t), \quad i=1,2. \tag{1}$$

여기서 $\phi_{ij}(x_i)$ 와 $q_{ij}(t)$ 는 각각 i 번째 링크의 j 번째 모드의 고유함수와 모달 좌표계를 나타낸다. 여기서 $\phi_{ij}(x_i)$ 와 시스템 파라미터는 고정단-질량단의 경계조건으로부터 구해진다.

i 번째의 유연링크 표면에 부착된 압전세라믹 작동기에 가해지는 전압, $V_i(x_i,t)$ 로부터 발생하는 굽힘모멘트 M_i 는 축방향에 대한 힘-평형 관계로부터 중립축에 대하여 구할 수 있으며 그 결과는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} M_i &= -\varepsilon_{ci}E_{ci}t_{ci}b_{ci}\left[t_{fi}+t_{ai}+\frac{t_{ci}}{2}-d_{ni}\right] \\ &= c_i\cdot V_i(x_i,t), \quad i=1,2. \end{aligned} \tag{2}$$

여기서 ε_{ci} 는 i 번째 링크의 전압 공급 시 압전세라믹에서 발생하는 변형률이며, d_{ni} 는 i 번째의 유연링크의 압전재료 부착 구간에서 압전필름 밑면으로부터 중립축까지의 거리로 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \varepsilon_{ci} &= V_i(x_i,t)\cdot d_{31}/t_{ci} \\ d_{ni} &= \frac{\sum_{k=1}^{3} y_{ki}b_{ki}t_{ki}E_{ki}}{\sum_{k=1}^{3} b_{ki}t_{ki}E_{ki}}, \quad k=1,2,3=f,a,c. \end{aligned} \tag{3}$$

여기서 t는 두께, b는 폭, y는 중심으로부터 거리, E는 굽힘강성, 그리고 첨자 a, c, f는 각각 알루미늄, 세라믹, 압전필름을 나타낸다. 또한 c_i는 굽힘 모멘트를 전압으로 나눈 값이며 제안된 링크의 기하학적 및 재료의 특성에 의하여 결정된다.

2.2 지배방정식

Fig. 1 과 같이 모터 허브에 고정된 두 쌍의 직각 단위 벡터 $(\mathbf{i}_1,\mathbf{j}_1)$와 $(\mathbf{i}_2,\mathbf{j}_2)$를 다음과 같이 정의 할 수 있다.

$$\begin{aligned}
\mathbf{i}_1 &= \begin{bmatrix}\cos\theta_1 & \sin\theta_1\end{bmatrix}^T,\\
\mathbf{j}_1 &= \begin{bmatrix}-\sin\theta_1 & \cos\theta_1\end{bmatrix}^T,\\
\mathbf{i}_2 &= \begin{bmatrix}\cos(\theta_1 + w_1'(L_1,t)+\theta_2)\\ \sin(\theta_1 + w_1'(L_1,t)+\theta_2)\end{bmatrix},\\
\mathbf{j}_2 &= \begin{bmatrix}-\sin(\theta_1 + w_1'(L_1,t)+\theta_2)\\ \cos(\theta_1 + w_1'(L_1,t)+\theta_2)\end{bmatrix}.
\end{aligned} \tag{4}$$

위치 벡터 $\mathbf{P}_i$와 $\mathbf{r}_i$ $(i=1,2)$은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
\mathbf{P}_1 &= L_1\mathbf{i}_1 + w_1(L_1,t)\mathbf{j}_1,\\
\mathbf{r}_1 &= x_1\mathbf{i}_1 + w_1(x_1,t)\mathbf{j}_1,\\
\mathbf{P}_2 &= \mathbf{P}_1 + L_2\mathbf{i}_2 + w_2(L_2,t)\mathbf{j}_2,\\
\mathbf{r}_2 &= \mathbf{P}_1 + x_2\mathbf{i}_2 + w_2(x_2,t)\mathbf{j}_2,
\end{aligned} \tag{5}$$

Euler-Bernoulli 보 이론에 따라 운동에너지와 변형에너지는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned}
2T_k &= I_s\dot\theta_1^2 + I_{me}\left(\dot\theta_1 + \dot w_1'(L_1,t)\right)^2\\
&\quad + I_e\left(\dot\theta_1 + \dot w_1'(L_1,t) + \dot\theta_2\right)^2\\
&\quad + I_t\left(\dot\theta_1 + \dot w_1'(L_1,t) + \dot\theta_2 + \dot w_2'(L_2,t)\right)^2\\
&\quad + m_e\dot{\mathbf{P}}_1^T\dot{\mathbf{P}}_1 + m_t\dot{\mathbf{P}}_2^T\dot{\mathbf{P}}_2\\
&\quad + \sum_{i=1}^{2}\left[\int_0^{l_i}\dot{\mathbf{r}}_i^T\dot{\mathbf{r}}_i\rho_i dx_i + \int_{l_i}^{L_i}\dot{\mathbf{r}}_i^T\dot{\mathbf{r}}_i\rho_{ai}dx_i\right].
\end{aligned} \tag{6}$$

$$\begin{aligned}
2V_s &= \sum_{i=1}^{2}\left[\int_0^{l_i}\frac{1}{EI_i}\begin{pmatrix}EI_i w_i''(x_i,t)\\ -c_i\cdot V_i(x_i,t)\end{pmatrix}^2 dx_i\right.\\
&\quad \left. + \int_{l_i}^{L_i} E_{ai}I_{ai}w_i''(x_i,t)^2 dx_i\right].
\end{aligned} \tag{7}$$

비 보존 토크 $T_1(t)$ 과 $T_2(t)$에 의한 외부 일은 다음과 같이 주어진다.

$$V_a = -\sum_{i=1}^{2}T_i(t)\cdot\theta_i(t). \tag{8}$$

이제 Lagrange 방정식을 적용하면 다음과 같이 지배방정식을 얻을 수 있다.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{z}} + \mathbf{f}(\mathbf{z},\dot{\mathbf{z}}) + \mathbf{K}\mathbf{z} = \mathbf{B}\mathbf{u}. \tag{9}$$

여기서, $\mathbf{M}$ 은 형상에 따라 변하는 시스템 질량 행렬, 링크의 탄성과 연계된 $\mathbf{K}$ 시스템 강성 행렬, $\mathbf{f}$ 는 비선형 관성 효과 함수 (Coriolis 힘과 원심력), $\mathbf{z}$ 는일반화 좌표 벡터, $\mathbf{B}$ 는 입력 행렬, $\mathbf{u}$ 제어 입력 벡터이며 다음 식들로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
\mathbf{M} &= \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & \mathbf{m}_{13} & \mathbf{m}_{14}\\ & m_{22} & \mathbf{m}_{23} & \mathbf{m}_{24}\\ & & \mathbf{m}_{33} & \mathbf{m}_{34}\\ sym & & & \mathbf{m}_{44}\end{bmatrix},\ \mathbf{K} = \begin{bmatrix}0 & & \boldsymbol{O}\\ & 0 & \\ & & \mathbf{k}_3\\ \boldsymbol{O} & & \mathbf{k}_4\end{bmatrix},\\
\mathbf{B} &= \begin{bmatrix}1 & & \boldsymbol{O}\\ & 1 & \\ & \Phi_1'(l_1) & \\ \boldsymbol{O} & & \Phi_2'(l_2)\end{bmatrix}\\
\mathbf{f} &= \begin{bmatrix}f_1\\ f_2\\ \vdots\\ f_\infty\end{bmatrix},\ \mathbf{u} = \begin{bmatrix}T_1\\ T_2\\ c_1V_1\\ c_2V_2\end{bmatrix},\ \mathbf{z} = \begin{bmatrix}\theta_1\\ \theta_2\\ \mathbf{q}_1\\ \mathbf{q}_2\end{bmatrix},\ \mathbf{q}_1 = \begin{bmatrix}q_{11}\\ q_{12}\\ \vdots\\ q_{1\infty}\end{bmatrix},\\
\mathbf{q}_2 &= \begin{bmatrix}q_{21}\\ q_{22}\\ \vdots\\ q_{2\infty}\end{bmatrix},\ \Phi_1 = \begin{bmatrix}\phi_{11}\\ \phi_{12}\\ \vdots\\ \phi_{1\infty}\end{bmatrix},\ \Phi_2 = \begin{bmatrix}\phi_{21}\\ \phi_{22}\\ \vdots\\ \phi_{2\infty}\end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{10}$$

m_{11}, m_{i2}, $\mathbf{m}_{i3}$, $\mathbf{m}_{i4}$, $\mathbf{k}_3$, $\mathbf{k}_4$ 그리고 f_i에 대한 자세한 표현은 참고문헌[9]에 나타나 있어 여기서는 생략한다. 지배방정식(10)로부터 시스템 모델이 고차의 비선형 시스템임을 알 수 있다.

3. 제어기 설계

Fig. 2 는 제안된 제어 방법의 블록선도를 나타낸다. 그림으로부터 만일 모터의 요구 각 변위가 슬라이딩 모드 제어기에 의해 얻어진다면 다음 단계로 제어할 것은 압전 세라믹 작동기에 진폭 제어기를 적용해서 링크의 바람직하지 않은 진동을 능동적으로 억제하는 것임을 알 수 있다.

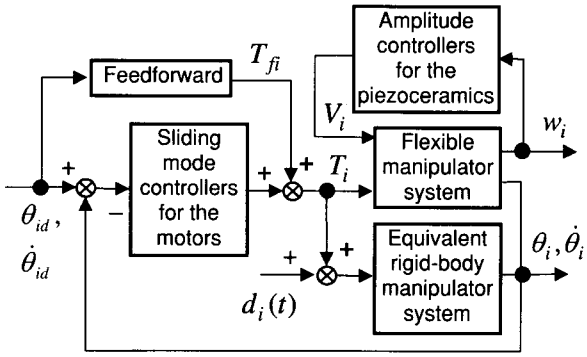

Fig. 2 A block-diagram of the proposed control algorithm

3.1 슬라이딩모드 제어기

먼저 시스템을 요구 위치로 구동하는 모터 토크를 결정하기 위해 슬라이딩 모드 제어기를 설계하고자 한다. 이를 위해서 제안된 유연 2링크 로봇 팔과 등가의 관성을 갖는 강체 2링크 로봇 팔의 운동방정식을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} mr_{11} & mr_{12} \\ mr_{21} & mr_{22} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix}+\begin{bmatrix} fr_1 \\ fr_2 \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \end{bmatrix}+\begin{bmatrix} d_1(t) \\ d_2(t) \end{bmatrix}. \quad (11)$$

여기서 mr_i 는 강체 2링크 로봇 팔의 질량행렬이고 fr_i 는 비선형 항이며 $d_i(t)$ 는 $|d_i(t)| \le \varepsilon_i$ 와 같이 한계를 갖는 토크 외란이다. 요구 궤적을 추적하기 위해 슬라이딩 모드 운동 중에 강건성을 갖는 슬라이딩 모드 제어기를 채택하였다.

강체 2링크 로봇 팔 시스템의 슬라이딩모드 상태에서 안정성을 보장하는 슬라이딩 초평면을 다음과 같이 정의하였다.

$$\begin{aligned} s_i(t) &= c_{i1}e_{11}(t)+c_{i2}e_{21}(t) \\ &\quad + mr_{i1}e_{12}(t)+mr_{i2}e_{22}(t), \quad i=1,2. \end{aligned} \quad (12)$$

여기서 c_{ij} 는 설계해야 할 슬라이딩 초평면의 시변 파라미터이고, $e_{i1}=\theta_i-\theta_{id}$ 와 $e_{i2}=\theta_i-\theta_{id}$ 는 추적 오차이다. 따라서, 슬라이딩 조건 $s_i\dot{s}_i<0$ 을 만족하는 슬라이딩 제어기 T_i 를 쉽게 설계할 수 있다. 이제 피드 포워드 보상과 연계된 슬라이딩 모드 제어기를 다음과 같이 제안할 수 있다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \end{bmatrix} &= -\begin{bmatrix} \dot{c}_{11} & \dot{c}_{12} \\ \dot{c}_{21} & \dot{c}_{22} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} e_{11} \\ e_{21} \end{bmatrix}-\begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} \\ c_{21} & c_{22} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} e_{12} \\ e_{22} \end{bmatrix} \\ &\quad +\begin{bmatrix} fr_1 \\ fr_2 \end{bmatrix}-\begin{bmatrix} \dot{mr}_{11} & \dot{mr}_{12} \\ \dot{mr}_{21} & \dot{mr}_{22} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} e_{12} \\ e_{22} \end{bmatrix} \\ &\quad +\begin{bmatrix} mr_{11} & mr_{12} \\ mr_{21} & mr_{22} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \ddot{\theta}_{1d} \\ \ddot{\theta}_{2d} \end{bmatrix}-\begin{bmatrix} kr_1\mathrm{sgn}(s_1) \\ kr_2\mathrm{sgn}(s_2) \end{bmatrix}+\begin{bmatrix} T_{f1} \\ T_{f2} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (13)$$

여기서 $T_{fi}, i=1,2$ 는 토크 외란을 보상하는 피드 포워드 항이며, 토크외란은 $|fr_i+d_i|<\varepsilon_{fi}<\varepsilon_i$ 로 한계를 갖는다. 따라서 슬라이딩 모드 제어기는 불연속 이득을 $kr_i>\varepsilon_{fi}, i=1,2$ 로 선정함으로써 슬라이딩모드 조건을 만족하게 된다. 한편, 슬라이딩 초평면의 초평면 파라미터 c_{ij} 는 다음과 같이 설계되었다.

$$\begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} \\ c_{21} & c_{22} \end{bmatrix}=-\begin{bmatrix} mr_{11} & mr_{21} \\ mr_{21} & mr_{22} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{bmatrix}. \quad (14)$$

여기서 λ_i 는 설계될 고유치이다. 이때 식(11), (13), 그리고 (14)로부터 제안된 제어기가 점근적으로 안정함을 알 수 있다[9].

3.2 고정진폭 제어기

강체 링크 로봇에서는 관절 각도 입력만 받아 적절한 제어방법을 사용하면 정확한 선단 위치 제어를 수행할 수 있다. 그러나 링크가 유연할 때는 선단 위치와 관절 각도의 관계가 더 이상 단순하지 않다. 따라서 선단 위치 운동이 정해진 시간 안에 원하는 정확성을 갖도록 제어하는 것이 어렵다. 이제 압전 세라믹 작동기에 대해 다음과 같은 고정 진폭 제어기[9]를 제안한다.

$$V_i(t)=-K_i\cdot\mathrm{sgn}(c_i\cdot\dot{V}_{fi}(t)), \quad i=1,2. \quad (15)$$

여기서 K_i 는 피드백 이득이며, $\dot{V}_{fi}(t)$ 는 유연 링크 표면에 접착된 분포형 압전 필름 감지기로부터 나오는 출력 신호 전압 $V_{fi}(t)$ 의 시간 미분으로 다음과 같다.

$$V_{fi}(t)=\frac{K_{31i}^{\,2}\cdot b_{fi}}{C_i g_{31i}}\left(d_{ni}\cdot\int_0^{l_i} p_i(x)\frac{\partial^2 w_i(x_i,t)}{\partial x_i^2}dx_i\right) \quad (16)$$

압전 필름 감지기로부터의 출력 전압은 필름의 모든 부분에서 생성된 전하를 필름 길이에 대하여

적분함으로써 얻어진다. 제어기 (15)의 피드백 이득 K_i는 적용되는 압전 세라믹 작동기와 적용되는 유연 링크의 기계적 및 물리적 성질에 따라 결정되는 일종의 물리적인 값으로 공급 전압 한계 내에서 시스템의 안정성이 보장되도록 선택해야 한다.

시스템의 안정성을 조사하기 위해서 먼저 로봇 팔의 운동에너지와 위치에너지로 이루어진 양의 한정 리아푸노프 함수 (positive definite Lyapunov functional)을 다음과 같이 설정한다.

$$F=\frac{1}{2}\dot{\mathbf{z}}^T\mathbf{M}\dot{\mathbf{z}}+\frac{1}{2}\mathbf{z}^T\mathbf{K}\mathbf{z}. \tag{17}$$

만약 속도 항들이 작고, 임의의 작은 양수 ε_{i+2}이 존재하여 $\left|\dot{\theta}_i \cdot T_i(t)\right| < \varepsilon_{i+2}$를 만족하면 식(17)에 대한 시간미분은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\frac{\partial F}{\partial t}&=\dot{\mathbf{z}}^T\mathbf{M}\ddot{\mathbf{z}}+\dot{\mathbf{z}}^T\mathbf{K}\mathbf{z}+\frac{1}{2}\dot{\mathbf{z}}^T\dot{\mathbf{M}}\dot{\mathbf{z}}=\dot{\mathbf{z}}^T\mathbf{B}\mathbf{u}+O(\mathbf{z}^3)\\ &\cong \dot{\theta}_1 T_1+\dot{\theta}_2 T_2\\ &\quad +c_1\frac{\partial^2 w_1(l_1,t)}{\partial t\partial x_1}V_1+c_2\frac{\partial^2 w_2(l_2,t)}{\partial t\partial x_2}V_2.\\ &< \varepsilon_3+\varepsilon_4-K_1\left|c_1\frac{\partial^2 w_1(l_1,t)}{\partial t\partial x_1}\right|-K_2\left|c_2\frac{\partial^2 w_2(l_2,t)}{\partial t\partial x_2}\right|\end{aligned} \tag{18}$$

이제, 리아푸노프 함수의 시간 미분을 음의 한정으로 만드는 적절한 제어 이득을 선택함으로써 시스템의 안정성을 보장할 수 있다. 제안된 제어기 $V_i(t)$는 진동모드를 생략하지 않은 분포형 시스템에 기초해서 설계되었다. 이것은 모든 진동 모드를 동시에 제어할 수 있는 가능성을 준다. 따라서 진동 모드를 생략해서 제어되지않는 모드에 의해 발생할 수 있는 제어 스필오버 (control spillover) 문제를 피할 수 있다.

제어 이득에 대한 가정은 허브의 운동이 등속 또는 감속 상태임을 의미한다. 이를 역설적으로 다시 설명하면 다음과 같다. 만일 로봇이 빠르게 가속운동을 하게 되면 유연 로봇 팔에 매우 큰 진동이 발생된다. 그러나 압전 작동기는 그 제어력의 한계성 때문에 이러한 진동을 완벽히 제어할 수 없게 되어 시스템의 안정성을 보장할 수 없다. 한편, 로봇 팔의 허브가 완전히 멈추었을 때 허브의 각 속도는 영이 되고 유연 로봇 팔은 외팔보(cantilever beams)와 같은 형태가 된다. 이 경우 식 (18)에서 첫 두 항이 사라지게 되고 K_i가 임의의 양수 값을 갖게 되면 리아푸노프 안정성이 항상 만족하게 된다. 부등식을 만족하는 피드백 이득 K_i의 크기는 양수 ε_{i+2}와 각 속도에 의존한다. 그러나 이러한 양을 해석적으로 계산하는 것은 매우 어렵기 때문에, 보통 허브의 운동과 유연 링크 진동의 크기를 실험적으로 고찰해서 적절한 피드백 이득의 크기를 구한다.

4. 실험결과 및 고찰

제안된 하이브리드 제어기의 제어성능을 입증하기위해 Table 1 과 같은 물리적 특성을 갖는 2 링크 유연 로봇 팔을 제안하였다. Fig. 3 은 실험장치 개략도를 나타낸다. 허브는 자체적인 유연성을 갖는 기어박스나 벨트장치를 피하기 위해서 서보모터 축에 바로 연결되었다. 정착 제어 성능을 조사 하기 위해서, 어깨와 팔 꿈치 관절의 요구 각 위치를 각각 30° 와 50° 로 설정하였다. 두 허브의 시작 점은 모두 -30° 로 설정하였다.

Fig. 4 는 정착제어응답이다. 그림으로부터 코깅

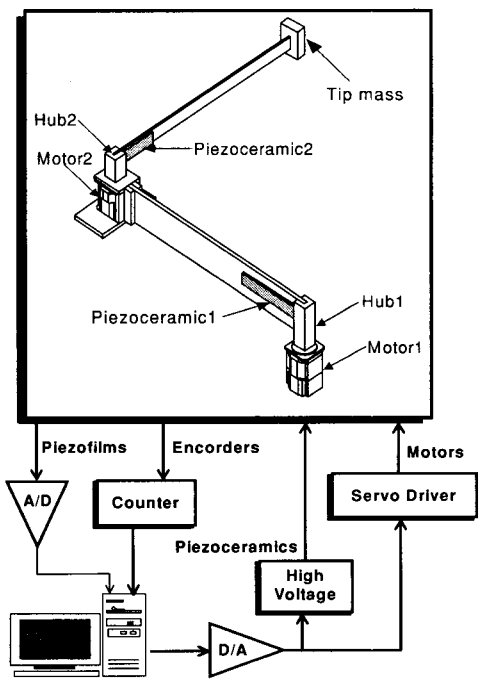

Fig. 3 Schematic diagram of experimental apparatus

Table 1 Dimensional and mechanical properties of the links and piezoelectric materials

	Piezo actuator	Piezo sensor	Shoulder link	Elbow link
Length(m)	0.16, 0.08	0.16, 0.08	0.538	0.439
Width(m)	0.04	0.025	0.1	0.04
Thickness (m)	8×10^{-4}	5.2×10^{-5}	0.002	0.00107
Density (g/cm^3)	7.7	1.78	2.69	2.69
E(GPa)	64	2	70	69.5
Capacitance of the piezofilm			380 pF/cm^2	
Piezoelectric stress constant of the piezofilm			216×10^{-3} (V/m)(N/m^2)	
Breaking operating voltage of the piezoceramic			400 V	
Piezoelectric strain constant of the piezoceramic			-300×10^{-12} (m/m)(V/m)	

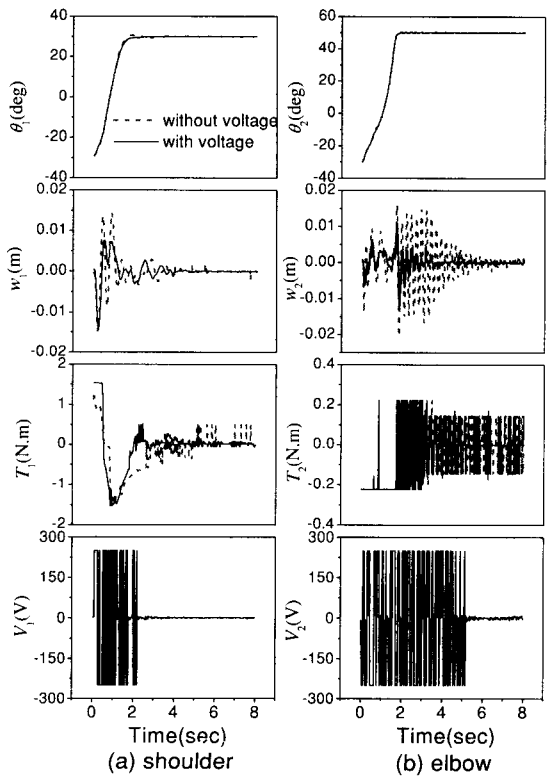

Fig. 4 Measured regulating responses

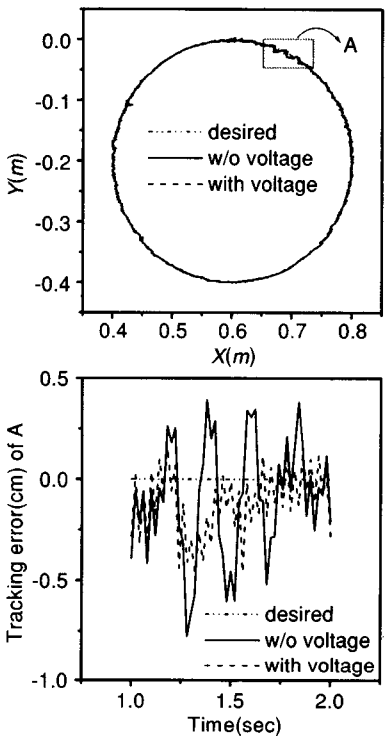

Fig. 5 Measured end-point trajectory response

과 마찰과 같은 토크 외란이 존재하여도 허브의 각 위치들은 요구 위치에 정확하게 정착함을 알 수 있다. 두 허브 각도에 같은 극점 값 ($\lambda_1 = \lambda_2 = -2$)을 설정하였으므로 두 허브 모두 약 1.8 초에 동시에 정착된다. 압전작동기를 구동하였을 때 바람직하지 않은 선단 변형의 진동이 확연히 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 진폭 제어기의 피드백 이득은 250 으로 설정되었다. 이 경우 압전 세라믹 작동기에 공급되는 최대 제어전압은 250V 이다. 정착제어 응답으로부터 제안된 하이브리드 작동기 제어 방법이 바람직하지 않은 선단의 진동하는 변형을 효과적으로 제어함을 알 수 있다. 둘째 단계로서, 제안된 제어 방법의 효과적인 추적 제어 성능 특성을 입증하기 위해서 로봇 팔 선단이 XY 평면에서 0.4m 의 지름을 갖는 원궤적 을 맨 위점에서 출발하여 시계방향으로 12 초의 주기로 추적하도록 하였다. Fig. 5 는 주어진 원 궤적의 추적 제어 응답을 나타내며, 이로부터 비교적 적은 추적오차를 갖고 끝단제어가 이루어졌음을 확인할 수 있다. 제어전압을 공급하지 않았을 때에는 약 0.4cm 의 선단 추적 오차가 발생하였다.

5. 결론

본 논문에서는 압전 작동기와 감지기를 이용한 유연한 2 링크 로봇 팔의 위치 및 진동 제어를 수행하였다. 첫 단계로서, 구속 조건을 갖는 모드 형상을 기초로 시스템 파라미터를 구하였다. 원하는 각 운동을 얻기 위하여 서보 모터에 대해 슬라이딩 모드 제어기를 설계하였다. 다음 단계로, 유연 링크의 진동을 능동적으로 억제 시키기 위하여 압전 세라믹 작동기에 대한 고정진폭 제어기를 설계하였다. 제안된 하이브리드 제어 알고리즘을 정착 및 추적 제어를 수행하기 위해 실험적으로 구현하였다. 실험 결과로부터 로봇 팔의 선단이 원하는 각 운동을 하는 동안 압전 세라믹을 구동시킴으로써 로봇 팔 선단의 바람직하지 않은 진동이 50%이상 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 제안된 방법의 성능향상을 위해서 압전재료의 최적 위치와 크기 선정에 대한 연구, 그리고 모터 마찰력의 정확한 보상에 대한 연구가 앞으로 수행되어야 할 것이다.

후 기

본 연구의 일부는 한국학술진흥재단 연구비(계약번호 : 1998-001-E00226)지원에 의해 수행되었으며, 이에 관계자께 감사 드립니다.

참고문헌

1. Book, W. J. and Majette, M., "Controller Design for Flexible Distributed Parameter Mechanical Arms via Combined State Space and Frequency Domain Techniques," ASME Journal of Systems, Measurement and Control, Vol. 105, pp. 245-254, 1983.
2. Schmitz, E., "Experiments on the Endpoint Position Control of a Very Flexible One-Link Manipulator," Ph.D Thesis, Dept. of Aeronautics and Astronautics, Stanford University, 1985.
3. Choi, S. B., Cheong, C. C. and Shin, H. C., "Sliding Mode Control of Vibration in a Single-Link Flexible Arm with Parameter Variations," Journal of Sound and Vibration, Vol. 179, 5, pp. 737-748, 1995.
4. Morita,Y., Ukai,H. and Kando,H., "Robust Trajectory Tracking Control of Elastic Robot Manipulators," ASME, J. of Dynamics Systems, Measurements and Control, Vol. 119, pp. 727-735, 1997.
5. Moudgal, V. G., Passino, K. M. and Yurkovich, S., "Rule-Based Control for a Flexible-Link Robot," IEEE Trans. on Control Systems Technology, Vol. 2, No. 4, pp. 392-405, 1994.
6. Choi, S. B., Cheong, C. C., Thompson, B. S. and Gandhi, M. V., "Vibration Control of Flexible Linkage Mechanisms Using Piezoelectric Films," Mechanism and Machine Theory, Vol. 29, No. 4, pp. 535-546, 1994.
7. Khorrami, F., Zeinoun, I. and Tome, E., "Experimental Results on Active Control of Flexible-Link Manipulators with Embedded Piezoceramics," Proc. IEEE Robotics and Automation Conference, pp. 222-227, Atlanta, GA, 1993.
8. Choi, S. B. and Shin, H. C., "A Hybrid Actuator Scheme for Robust Position Control of a Flexible Single Link Manipulator," Journal of Robotic Systems, Vol. 13, No. 6, pp. 359-370, 1996.
9. H. C. Shin, "Position control of flexible manipulators featuring piezoelectric actuators and sensors," Ph. D. Dissertation, Dept. of Mech., Inha Univ. Korea, 1998.