

반력모멘트 추정기를 이용한 단일 링크 유연 조작기의 진동제어

Vibration Control of a Single-link Flexible Manipulator Using Reaction Moment Estimator

신 호 철* · 한 상 수* · 김 승 호**

Hocheol Shin, Sangsoo Han and Seungho Kim

(2004년 9월 23일 접수 : 2005년 1월 26일 심사완료)

Key Words : Vibration Control(진동제어), Flexible Manipulator(유연조작기), Sliding Mode Control(슬라이딩 모드제어), Reaction Moment Estimator(반력모멘트추정기)

ABSTRACT

In this paper, a novel vibration control scheme for a single-link flexible manipulator system without using a vibration feedback sensor is proposed. In order to achieve the vibration information of the flexible link, a reaction moment estimator based on the dynamic characteristics of the flexible manipulator is proposed. While the manipulator is maneuvering the reaction moment is reciprocally acting on the flexible link and the hub inertia due to the vibration of the link. A sliding mode controller based on the equivalent rigid body dynamics corresponding to the proposed flexible manipulator is then augmented with the reaction moment estimator to realize a decentralized control system. The reaction moment estimator is implemented via the first order low pass filter. The performance of the proposed control scheme is verified by computer simulation and experiment.

기 호 설 명

- $E_a I_a$: 유연 링크의 굽힘강성(Nm²)
- I_b : 유연 링크의 관성(kgm²)
- I_H : 모터를 포함한 허브(hub) 전체관성(kgm²)
- $M_r(T)$: 반력모멘트(Nm)
- m_r : 선단질량(kg)
- $M_f(t)$: 저주파 통과필터를 거친 반력모멘트(Nm)
- $O-r$: 고정 기준축
- $O-X$: 유연 링크의 중립축 접선
- ρ_a : 유연 링크의 단위길이 당 질량(kg/m)

- $\theta(t)$: 허브의 각변위(rad)
- τ_m : 모터의 출력 토크(Nm)
- $y(x,t)$: 위치 x 에서의 유연 링크 절대변위(m)

1. 서 론

로봇의 경량화 및 작업 효율 향상을 목적으로 개발되기 시작한 유연 조작기는 과거 20여 년간 꾸준한 연구가 진행되어 왔으며 향후 우주산업, 주/중 조작기 시스템을 이용한 원격작업 등의 분야가 발전함에 따라 활용범위가 더욱 확대될 것으로 전망된다. 그러나, 유연 조작기는 작업 시 구조적 유연성에 기인하는 진동이 필연적으로 수반되며 이를 방지하거나 신속히 제거하지 못할 경우 오히려 작업 효율의 저하뿐만 아니라 시스템의 불안정을 초래할 수 있는 문제점이 존재한다. 따라서 유연 조작기가 갖는 이러한 문제점을 극복하기 위해 지금까지 수많은 방법들이 제

† 책임저자 : 정희원, 한국원자력연구소 원자력로봇팀
E-mail : smarthc@kaeri.re.kr
Tel : (042) 868-8836, Fax : (042) 868-8833

* 한국원자력연구소 원자력로봇팀

** 정희원, 한국원자력연구소 원자력로봇팀

안되어 왔다. 유연 조작기는 강체 조작기와 달리 경량화된 긴 링크의 구조적 특성상 구동 중 링크에서 발생하는 진동으로 인해 선단의 정확한 위치를 파악할 수 없기 때문에 되먹임(feedback) 제어를 위한 진동 센서가 설치되어야 한다. 따라서 기존에 수행된 대부분의 유연 조작기 제어에 관한 연구는 진동을 감지하기 위한 센서를 부착하거나 비전(vision)을 이용한 위치추적을 통해 제어를 수행해왔다.^(1~4)

이러한 센서의 사용은 유연 조작기 제어 시스템의 성능과 강건성을 보장하는 장점을 갖지만 필드 적용 시 센서의 고장이나 결선 등의 문제가 발생하였을 때 센서의 교체나 수리가 이루어질 때까지 조작기를 구동할 수 없으며 주변의 전자기적 영향 혹은 각종 외부 극한환경에 의해 센서의 신호잡음이 커질 경우 제어 성능 악화를 초래하고 나아가 시스템 전체의 불안정성을 초래할 수 있는 단점이 존재한다. 더욱이 유연 조작기의 적용 분야가 앞서 언급한 바와 같이 일반적인 작업환경 보다는 우주나 극한환경 원격작업 등 인간의 접근이 용이하지 않은 분야에서 활용될 경우 이러한 문제점이 더욱 심각하게 고려되어야만 한다. 따라서, 이 연구에서는 이러한 점에 착안하여 진동을 측정하기 위한 별도의 센서를 사용하지 않고 유연 조작기의 동적 특성에 근거하여 진동을 효과적으로 억제할 수 있는 방법을 제안하고자 한다.

유연 조작기는 거시적으로 구동을 위한 허브를 포함한 모터와 유연 링크의 두 관성부(inertia part)로 나누어 생각할 수 있으며 조작기 구동 중에는 유연 링크의 탄성으로 인해 두 관성부 상호 간에 반력이 작용하게 된다.⁽⁵⁾ 따라서, 이 반력은 유연 링크에서 발생하는 진동과 관계가 있으며 이 반력의 값을 추정하게 되면 간접적인 방법으로 진동을 감지할 수 있게 된다. 이 연구에서는 이를 위해 우선 유연 조작기의 운동 지배방정식과 경계조건을 도출한 후, 제어입력 토크와 허브를 포함한 모터의 관성력, 반력모멘트 간의 관계를 나타내는 경계조건으로부터 반력모멘트 추정기(reaction moment estimator: RME)를 제안하였다. 제안된 반력모멘트 추정기를 이용함과 동시에 유연 조작기의 강체 모드 운동에 대한 분산화된 제어를 위해 시스템 불확실성 및 외란에 강인한 특성을 갖는 슬라이딩 모드 제어를 도입함으로써, 유연 조작기의 신속한 위치제어를 위해서는 슬라이딩 모드 제어를 이용하고 이 때 유발되는 진동은 반력모멘

트 추정기의 되먹임 신호를 이용하여 효과적으로 제어할 수 있도록 하였다.

제안된 제어방법의 성능과 효용성을 입증하기 위해 컴퓨터 시뮬레이션과 실험을 수행하고 결과를 도시하였다.

2. 유연 조작기의 모델링

Fig.1은 단일링크 유연 조작기의 개략도를 도시한 것이다. 일반적으로 단일링크 유연 조작기는 구동을 위한 작동기인 서보모터, 링크와 모터를 연결하기 위한 허브, 유연 링크, 선단질량 등으로 구성된다. Fig.1에 나타난 바와 같이 허브 중심으로부터 x 만큼 떨어진 위치에서 링크의 변위는 허브의 각 변위 θ 에 의한 변위 $x \cdot \theta$ 와 탄성변형량 w 의 합으로 다음과 같이 정의된다.

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

전체시스템의 운동지배방정식을 도출하기 위해 유연 조작기가 갖는 운동에너지(T_k), 변형에너지(V_s) 및 가상일(V_a)을 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$T_k = \frac{1}{2} \left[I_H \dot{\theta}^2 + \int_0^L \rho_a \dot{y}^2 dx + m_T \dot{y}^2 \Big|_{x=L} \right] \tag{2}$$

$$V_s = \frac{1}{2} \int_0^L E_a J_a y''^2 dx \tag{3}$$

$$V_a = -\tau_m \theta \tag{4}$$

따라서, 식 (2)~(4)에 Hamilton를 적용하면,

$$\int_{t_1}^{t_2} \delta(T_k - V_s - V_a) dt = 0, \quad t_1 < t_2 \tag{5}$$

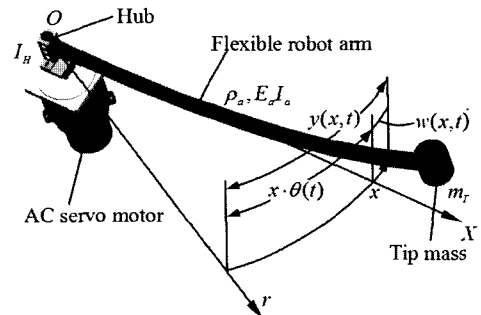


Fig. 1 Schematic drawing of a single-link flexible manipulator

이고, 단일링크 유연 조작기의 운동 지배방정식을 다음 식 (6)과 같이 유도할 수 있다.

$$E_a I_a y^{iv} + \rho_a \ddot{y} = 0 \quad (6)$$

이때 시스템의 경계조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} E_a I_a y''|_{x=0} - I_H \ddot{\theta} + \tau_m &= 0 \\ E_a I_a y'''|_{x=L} &= m_r \ddot{y}|_{x=L} \\ E_a I_a y''|_{x=L} &= 0 \\ y(0, t) &= 0. \end{aligned} \quad (7)$$

여기서, 식 (7)에 나타난 경계조건 중 첫 번째 식은 물리적으로 모터의 제어입력 토크 τ_m 과 유연 조작기의 운동 중 허브관성에 영향을 미치는 반력모멘트 간의 관계를 의미한다. 즉, 이 반력모멘트는 유연 링크의 진동에 기인하는 것으로서 이 값을 알 수 있다면 간접적인 방법으로 진동을 감지할 수 있다. 따라서, 이 정보를 이용하여 별도의 진동 측정을 위한 센서를 사용하지 않고 유연 링크에서 발생하는 진동을 효과적으로 억제할 수 있는 반력모멘트 추정기를 도출할 수 있다. 다음 장에서는 식 (7)에 주어진 첫 번째 경계조건에 근거하여 반력모멘트 추정기를 설계하고 이와 연동하는 슬라이딩 모드 제어기 설계를 수행한다.

3. 제어기 설계

3.1 반력모멘트 추정기의 설계

식 (7)에 주어진 첫 번째 경계조건으로부터 모터와 허브의 관성을 포함하는 I_H 의 계산 값이 실제 관성의 크기와 같으며, 모터의 출력 토크 (τ_m)와 제어입력 간의 관계를 나타내는 모터 정수를 정확히 알고 있다는 가정을 도입하면, 유연 링크의 진동에 의해 발생하는 반력모멘트를 추정하기 위해 다음과 같은 관계식을 유도할 수 있다.

$$M_r(T) = I_H \ddot{\theta}(T) - \tau_m(T - \delta_1) \quad (8)$$

식 (8)에 주어진 바와 같이 현재 시간(T)에 허브에 작용하는 반력모멘트 값 $M_r(t)$ 는 한 스텝 이전 시간에 저장된 제어입력 토크 $\tau_m(T - \delta_1)$ 과 현재 시간의 관성력 $I_H \ddot{\theta}(T)$ 을 이용하여 계산할 수 있다.

그러나, 이 수식에서 살펴볼 수 있듯이 관성력의 값을 계산하기 위해서는 엔코더를 사용할 경우 샘플링된 각 변위 데이터의 값을 두 번 미분해야만 한다. 이와 같이 연속적이지 않은 값을 미분하는 과정에서 불가피하게 각가속도의 값이 실제보다 크게 계산되고 바람직하지 않은 고주파 성분이 발생하여 정확한 반력모멘트의 크기를 추정할 수 없는 문제가 존재한다. 따라서, 다음과 같이 컷오프(cut-off) 주파수가 λ 인 1차의 저주파 통과필터(low pass filter)를 적용하여 반력모멘트 $M_{fr}(t)$ 을 추정하도록 한다.

$$\begin{aligned} \xi(t) &= -\lambda \xi(t) + M_r(t) \\ M_{fr}(t) &= \lambda \xi(t). \end{aligned} \quad (9)$$

이러한 저주파 통과필터를 사용함으로써 신호잡음의 영향과 각 가속도를 구하는 과정에서 두 번 미분으로 인해 생기는 오류의 영향을 감소시켜 안정적인 제어입력을 얻을 수 있다. 그러나, 지나치게 낮은 컷오프 주파수를 설정할 경우 실제 반력모멘트 값과의 위상차가 크게 발생하여 제어 성능 악화를 가져올 수 있으므로 적절한 주파수의 선정이 중요하며 이 연구에서는 해석적 방법에 의해 미리 도출한 유연 조작기의 1차 진동 모드를 고려하여 40 rad/s를 저주파 통과필터의 컷-오프 주파수로 사용하였다.

Fig. 2는 이 연구에서 제안한 반력모멘트 추정기의 구조를 도시한 것이며 여기서 제어입력 $u_v(t)$ 는 다음 절에 설계될 슬라이딩 모드 제어기의 입력을 나타낸다. 또한, 제안된 반력모멘트 추정기의 구조를 살펴보면 일반적으로 강건제어 시스템에 자주 사용되는 외란추정기(disturbance observer)의 형태와 동일한

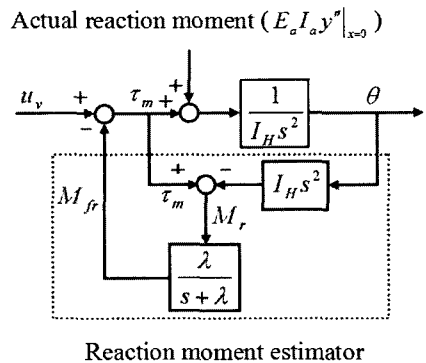


Fig. 2 The block diagram of the proposed reaction moment estimator

구조임을 확인할 수 있다.⁽⁶⁾ 물리적으로 유연 링크의 진동에 기인하는 반력모멘트는 모터의 입장에서 볼 때 작동 토크에 가해지는 외란 입력에 해당하므로 주어진 경계조건으로부터 유도된 반력모멘트 추정기가 결국 외란 추정기와 동일한 형태를 갖게 되는 것이다. 즉, 이 관계를 통해 제안된 반력모멘트 추정기가 외란 추정기의 특수한 형태임을 확인할 수 있다.

3.2 슬라이딩 모드 제어기의 설계

이 연구에서는 유연 조작기의 제어에 효과적인 성능이 입증된 바 있는 분산화 제어방법⁽³⁾을 도입하였다. 이 방법을 이용하면 유연 링크를 이와 등가의 관성을 갖는 강체 링크로 간주함으로써 복잡한 유연 조작기의 로봇 동역학을 고려하지 않고 단순화된 강체 조작기 시스템에 대한 제어기를 설계할 수 있다. 한편, 제안된 시스템은 유연 링크에서 발생하는 진동이 허브의 위치제어 시 외란으로써 작용하므로 이를 보상하여 요구 각 변위를 얻기 위해 강건 제어기의 하나인 슬라이딩 모드 제어기를 설계하였다. 먼저 다음과 같이 유연 링크의 관성 I_b 를 포함하는 단순화된 강체 조작기의 지배방정식을 고려한다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \frac{1}{I_H + I_b} u_v + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} d(t). \quad (10)$$

여기서 $d(t)$ 는 속도에 따라 변화하는 모터의 점성 마찰토크 및 유연 링크의 진동에 기인하는 외란을 의미하며 다음과 같이 일정한 경계값 δ_2 보다 작은 크기를 갖는 형태로 정의할 수 있다.

$$|d(t)| \leq \delta_2, \quad \delta_2 > 0. \quad (11)$$

슬라이딩 모드 제어기의 설계를 위해 요구 각 변위 θ_d 에 대하여 오차벡터 $\mathbf{e} = [\theta_d - \theta \quad \dot{\theta}_d - \dot{\theta}]^T$ 를 정의하면 다음과 같은 슬라이딩 평면을 도출할 수 있다.^(3,7)

$$\mathbf{s}(t) = \mathbf{c}\mathbf{e}(t) = c_1(\theta - \theta_d) + c_2(\dot{\theta} - \dot{\theta}_d). \quad (12)$$

여기서 $c_1, c_2 (> 0)$ 는 슬라이딩 평면의 기울기를 나타낸다. 한편 식 (12)에 정의된 슬라이딩 평면에 대하여 슬라이딩 모드 존재조건 $\mathbf{s}(t)\dot{\mathbf{s}}(t) < 0$ 를 만족하는 제어입력 $u_v(t)$ 는 다음과 같다.

$$u_v(t) = (I_H + I_b) \cdot \left\{ \frac{c_1}{c_2} (\dot{\theta}_d - \dot{\theta}) + \ddot{\theta}_d + k \cdot \text{sgn}(s(t)) \right\}, \quad k > \delta_2. \quad (13)$$

식 (11)과 같이 불연속 제어기인 k 의 값을 δ_2 의 크기보다 크게 설계함으로써 마찰 토크의 영향이나 유연 링크의 진동에 의한 외란, 시스템 변수 불확실성(uncertainty) 및 변동(perturbation)에 따른 영향 등을 보상하여 요구 각 변위에 수렴하도록 할 수 있다. 또한 불연속 제어기 적용에 따른 채터링(chattering) 문제를 효과적으로 해결하기 위해 부호함수 $\text{sgn}(\cdot)$ 대신 이에 근사한 연속함수 $\text{sat}(\cdot)$ 를 다음과 같이 정의하여 적용한다.

$$\text{sat}(s(t)) = \begin{cases} s(t)/\epsilon & |s(t)| \leq \epsilon \\ \text{sgn}(s(t)) & |s(t)| > \epsilon \end{cases}. \quad (14)$$

앞서 도출한 식 (8)과 식 (13)에서 볼 수 있듯이 유연 조작기 선단의 위치제어를 위해 이 연구의 제어기법이 요구하는 정보는 오직 모터에 부착된 엔코더(encoder)로부터 측정된 각 변위 신호뿐임을 알 수 있다.

전술한 바와 같이 반력모멘트의 추정 값에 근거하여 유연 링크에 발생하는 진동을 억제하기 위한 제어 입력과 로봇의 강체운동을 제어하기 위한 슬라이딩 모드 제어입력을 더하면 최종적으로 다음과 같이 분산화된 형태의 제어기를 얻을 수 있다. 여기서 $\tau_m(t)$ 는 유연 조작기에 공급되는 실제 제어 입력을 의미한다.

$$\tau_m(t) = u_v(t) - M_f(t). \quad (15)$$

Table 1은 제안된 슬라이딩 모드 제어기의 구현을 위해 시뮬레이션 및 실험에 사용된 실제 변수들의 값을 나타낸다.

Table 1 Parameters for the sliding mode controller

Parameter	Value
Sliding surface (c_1)	0.05
Sliding surface (c_2)	0.005
Discontinuous controller gain (k)	140
Boundary layer thickness (ϵ)	0.02

4. 실험결과 및 토의

4.1 시뮬레이션 결과

Fig. 3는 반력모멘트 추정기를 이용한 진동제어 성능을 검증하기 위해 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하고 그 결과를 도시한 것이다. 시뮬레이션은 유연 링크의 2차 진동모드까지 고려하였으며 실험과 동일하게 1 kHz의 샘플링으로 수행되었다.

Fig. 3은 유연 조작기를 강체 조작기로 가정하고 제어한 경우 즉, 유연 링크의 진동은 고려하지 않고 제어한 경우와 식 (15)에 나타난 바와 같이 반력모멘트 추정기를 추가하여 유연 링크의 진동까지 함께 제어한 경우의 결과를 비교하여 도시한 것이다. 반력모

멘트 추정기를 적용한 경우 반력 값을 보상하는 과정에서 제동 토크의 값이 다소 감쇄하여 Fig. 3(b)에 도시한 바와 같이 각 변위에 약간의 오버슈트(overshoot)가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 반력모멘트 추정기를 적용하지 않은 경우에 비해 반력모멘트의 보상을 수행한 경우 Fig. 3(d)에 나타난 바와 같이 빠르게 유연 링크의 진동이 억제되는 것을 확인할 수 있다. Fig. 3(e)와 Fig. 3(f)는 제어입력 값을 나타낸 것으로 반력모멘트 추정기를 적용한 경우 보다 적은 제어입력으로 효과적인 제어가 이루어짐을 확인할 수 있다.

4.2 실험 결과

Table 2는 이 연구에서 실험에 사용된 유연 조작

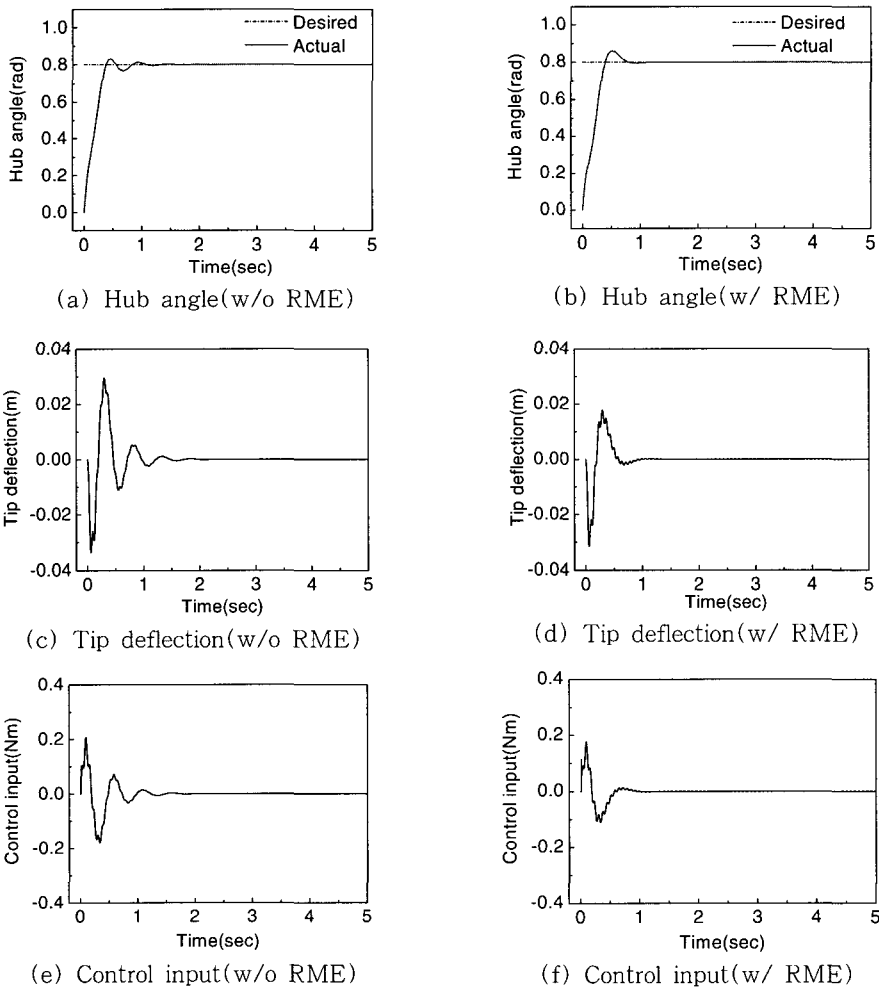


Fig. 3 Simulation results of the proposed controller

Table 2 Specifications of the flexible manipulator

Parameter	Value
Length of flexible arm (L)	0.6 m
Thickness of flexible arm (t)	0.001 m
Width of flexible arm (b)	0.025 m
Bending stiffness ($E_a I_a$)	0.1437 Nm ²
Mass density per unit length (ρ_a)	0.0678 kg/m
Moment of inertia of flexible arm (I_b)	4.878e-3 kgm ²
Moment of inertia of hub and rotor (I_H)	6.049e-4 kgm ²
Natural frequency(1 st mode)	6.0 Hz
Natural frequency(2 nd mode)	15.7 Hz
Damping coefficient of flexible arm	0.0015
Motor coefficient	0.237 Nm/Vdc

기의 제원을 나타낸다. 유연 링크는 길이 0.6 m, 두께 1 mm의 알루미늄 합금을 사용하였으며 유연 조작기의 제어를 위해 사용된 작동기는 정격출력 200 Watt 교류 서보모터로써 17 bit 엔코더(encoder)를 장착하

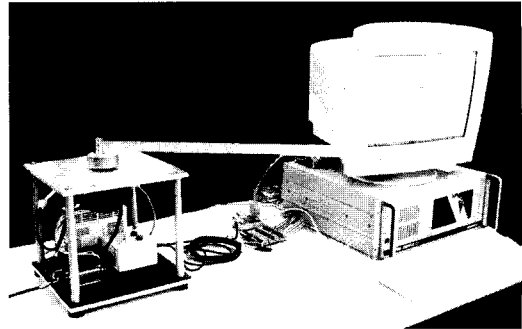
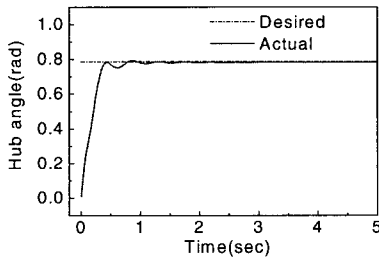
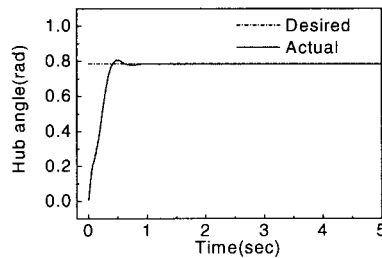


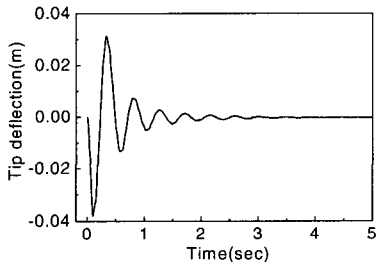
Fig. 4 Experimental flexible manipulator system



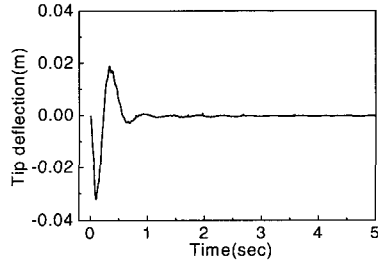
(a) Hub angle(w/o RME)



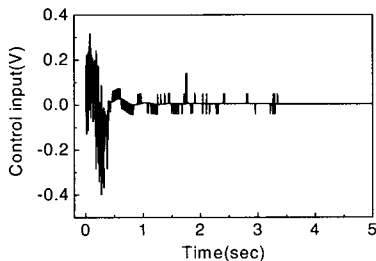
(b) Hub angle(w/ RME)



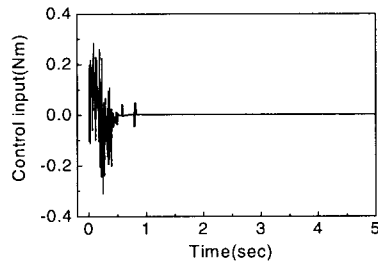
(c) Tip deflection(w/o RME)



(d) Tip deflection(w/ RME)



(e) Control input(w/o RME)



(f) Control input(w/RME)

Fig. 5 Experimental results of the proposed controller

고 있다. Fig. 4는 이 연구의 실험을 수행하기 위해 제작된 유연 조작기 시스템을 나타낸다. 유연 링크의 제어를 위해 감속기 없이 직접 구동 방식을 이용하였으며 제어가 적용을 위해 A/D, D/A변환기 및 Counter 보드와 PC를 사용하였다.

Fig. 5는 제안된 제어방법을 이용하여 실험을 수행한 결과를 도시한 것이다. Fig. 3에 나타난 시뮬레이션 결과와 유사한 결과를 얻었으며 이 연구에서 제안된 반력모멘트 추정기를 이용하였을 때 유연 링크에서 발생한 진동이 1초 이내에 빠르게 제어되는 것을 확인할 수 있다. 또한, Fig. 5(c)와 비교해볼 때 유연 조작기 운동 중에도 진동의 크기가 좀 더 억제되는 것을 알 수 있다. 즉 이 연구에서 제안된 반력모멘트 추정기를 적용함으로써 직접적으로 진동을 측정하기 위한 센서를 사용하지 않고도 유연조작기의 효과적인 진동제어가 가능함을 실험적으로 입증하였다.

2. 결 론

이 연구에서는 유연 조작기의 위치제어 시 필연적으로 수반되는 진동의 효과적인 제어를 위해 반력 모멘트 추정기를 제안하고 이를 이용한 새로운 진동제어기법을 제안하였다.

유연 조작기의 운동 경계조건으로부터 유도된 반력 모멘트 추정기는 결국 일반적인 외란추정기의 형태로 정리될 수 있음을 확인하였다. 또한, 제어알고리즘을 보다 쉽게 설계하고 효과적으로 적용할 수 있도록 등가의 강제모드를 고려한 슬라이딩 모드 제어를 설계하고 이를 반력모멘트 추정기와 연계함으로써 분산화된 제어방법을 효과적으로 적용하였다.

제안된 제어방법의 성능을 검증하기 위해 컴퓨터 시뮬레이션 및 실험을 수행하였으며, 그 결과 유연 링크에 진동추정을 위한 센서를 사용하지 않고 모터에 부착된 엔코더의 각 변위 신호만을 이용하여 유연 조작기의 효과적인 제어가 가능함을 입증하였다.

향후 유연 조작기 끝단 질량을 부착하여 시스템공진 주파수와 같은 주요 시스템 변수의 변동이 발생하였을 때 제안된 제어기의 강건성을 입증하기 위한 시뮬레이션 및 실험을 수행할 예정이다. 또한 저주파 필터의 통과대역을 변화시켜 고차 진동 모드에 의한 스펙오버(spillover) 문제의 영향을 고찰하고 제안된

제어방법의 유효성을 검증한 후 2링크 유연 조작기 시스템으로의 확장된 연구를 진행할 계획이다.

후 기

이 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- (1) Cannon, R. H., and Schmitz, J. E., 1984, "Initial Experiments on the End-Point Control of a Flexible One-Link Robot", *International Journal of Robotics Research*, Vol. 3, No. 3, pp. 62~75.
- (2) Carusone, J., Buchan, K. S., and D'Eleuterio, G. M. T., 1993, "Experiments in End-effector Tracking Control for Structurally Flexible Space Manipulators", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 9, pp. 553~560.
- (3) Choi, S. B., and Shin, H. C., 1996, "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.
- (4) 신호철, 최승복, 1996, "압전 작동기를 이용한 매우 유연한 로봇 팔의 진동 제어", *한국소음진동공학회논문집*, 제 6 권, 제 2 호, pp. 187~196.
- (5) Yuki, K., Murakami, T., and Ohnishi, K., 1993, "Vibration Control of 2 Mass Resonant System by Resonance Ratio Control", *Proceedings of the IECON '93 International Conference on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation*, pp. 2009~2014.
- (6) Murakami, T., and Ohnishi, K., 1993, "Dynamics Identification Method of Multi-Degree Robot by Disturbance Observer", *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol. 11, No. 1.
- (7) Slotine, J. J., and Sastry, S. S., 1983, "Tracking Control of Non-linear Systems Using Sliding Surface, with Application to Robot Manipulators", *International Journal of Control*, Vol. 38, No. 2, pp. 456~492.