

단일링크 유연매니플레이터의 센서리스 진동제어 Sensorless Vibration Control of a Single-Link Flexible Manipulator

한상수* · 신호철** · 서용철** · 김승호**

Han, Sang-Soo, Shin, Ho-Cheol, Seo, Yong-Chil and Kim, Seung-Ho

Key Words : Sensorless Control(센서리스제어), Vibration Control(진동제어), Flexible Manipulator(유연매니플레이터), Sliding Mode Control(슬라이딩모드제어), Reaction Moment Observer(반력모멘트 관측기)

ABSTRACT

In this paper, a new sensorless vibration control scheme is proposed for a flexible manipulator system. A robust sliding mode controller incorporating with a 'reaction moment observer' used for the estimation of the reaction moment reciprocally acting on flexible arm and hub inertia is introduced to achieve desired control target. The rigid body dynamics of the single-link flexible manipulator is simply considered in the design of the sliding mode controller. Then, the reaction moment is estimated by the proposed reaction moment observer to suppress the residual vibration of the flexible arm. The performance of the proposed control scheme is verified by computer simulation and experiment.

기호설명

- I_H : 모터의 관성을 포함한 허브 관성(kgm^2)
- I_b : 유연 로봇 팔의 관성(kgm^2)
- ρ_a : 유연 로봇 팔의 단위길이당 질량(kg/m)
- $E_a I_a$: 유연 로봇 팔의 굽힘강성(Nm^2)
- m_r : 선단 질량(kg)
- $O-r$: 고정 기준축
- $O-X$: 유연 로봇 팔의 중립축 접선
- $\theta(t)$: 허브의 각변위(rad)
- $y(x,t)$: x 에서의 유연 로봇 팔 절대변위(m)

1. 서론

로봇의 경량화 및 작업효율 향상을 목적으로서 제안된 유연 매니플레이터는 향후 우주산업의 발달과 더불어 그 적용분야가 더욱 확대될 것으로 전망된다. 그러나, 유연 매니플레이터는 작업 시 구조적 유연성에 기인한 진동이 필연적으로 발생하며 이를 신속히 제거하지 못할 경우 오히려 작업 효율의 저하뿐만 아니라 시스템의 불안정을 초

래할 수 있는 문제점을 갖는다. 지난 20 여 년 간 유연 매니플레이터의 이러한 문제점을 극복하기 위한 다양한 노력이 진행되어왔으며 이들 대부분의 연구는 유연 매니플레이터에서 발생하는 진동을 직접적으로 감지하기 위해 유연 로봇 팔에 진동측정을 위한 센서를 부착하거나 비전(vision) 센서 등을 이용하여 제어를 수행하도록 하였다^[1,2]. 그러나, 이러한 센서의 사용은 경제적 측면에서 바람직하지 못할 뿐만 아니라 측정방식에 따라 유연 매니플레이터 자체의 동적 특성을 변화시키고 제어성능에 민감한 영향을 미칠 수 있으며 또한, 신호잡음에 대한 대책을 요구하는 등 제어기 설계에 있어 제약 조건을 부가하게 된다. 따라서, 본 연구에서는 진동을 측정하기 위한 부가적인 센서의 사용 없이 유연 매니플레이터의 동적 특성에 근거하여 허브관성과 유연 로봇 팔 간에 상호 작용하는 반력모멘트(reaction moment)를 추정함으로써 유연 매니플레이터의 진동을 효과적으로 억제하는 방법을 제시하였다. 이를 위해 우선 유연 매니플레이터의 운동 지배방정식과 경계조건을 도출한 후, 제어입력 토크와 허브를 포함한 모터 축의 관성력, 반력모멘트 간의 관계를 나타낸 경계조건으로부터 반력모멘트 관측기를 제안하였다.

한편, 본 연구에서는 보다 단순하고 쉬운 적용이 가능하도록 분산화된 제어를 도입하였다. 즉,

* 한국원자력연구소 원자력로봇랩
E-mail : ex-sshan@kaeri.re.kr
Tel : (042) 868-2931, Fax : (042) 868-8833
** 한국원자력연구소 원자력로봇랩

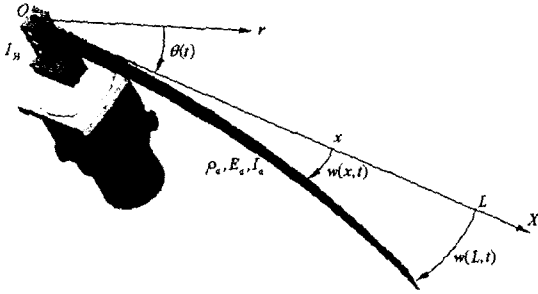


Fig. 1 Schematic of a Single-Link Flexible Manipulator

유연 매니플레이터의 강체모드만을 고려한 슬라이딩모드 제어를 설계하여 모터에 공급되는 제어입력을 결정하도록 하고 운동 중 발생하는 유연 로봇 팔의 진동은 추정된 반력모멘트를 되먹임 하여 제어입력에 더해줌으로써 빠른 위치제어와 더불어 효과적인 진동제어가 이루어지도록 하였다.

컴퓨터 모의시뮬레이션과 실험을 통해 제안된 제어방법의 성능을 고찰하고 그 결과를 도시하였다.

2. 단일링크 유연매니플레이터

Fig.1 은 단일링크 유연 매니플레이터의 모델링을 위한 개략도를 도시한 것이다. 유연 매니플레이터가 갖는 운동 에너지, 변형 에너지 및 제어입력에 의한 일을 도출한 후 Hamilton 의 원리를 이용하면 다음과 같은 유연 매니플레이터의 운동 지배방정식을 얻을 수 있다.

$$E_a I_a y^{(IV)} + \rho_a \ddot{y} = 0 \quad (1)$$

또한, 이때 주어진 시스템의 경계조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} E_a I_a y''|_{x=0} - I_H \ddot{\theta} + \tau_m &= 0 \\ E_a I_a y''|_{x=L} &= m_T \ddot{y}|_{x=L} \\ E_a I_a y'''|_{x=L} &= 0 \\ y(0, t) &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

한편, 식(2)의 첫 번째 경계조건은 물리적으로 모터의 제어입력 토크 τ_m 과 유연 매니플레이터 운동 중 허브관성에 미치는 반력모멘트 영향간의 관계를 의미한다. 즉, 이 반력모멘트는 유연 로봇 팔의 진동에 기인하는 것으로 이 값을 추정하게 되면 간접적인 방법으로 진동을 감지할 수 있으며 이 정보를

이용하면 진동센서 없이 유연 로봇 팔에서 발생하는 진동을 억제할 수 있다. 따라서, 다음 장에서는 식(2)의 첫 번째 경계조건에 의한 반력모멘트 관측기를 설계하고 이와 연계되는 슬라이딩 모드 제어기 설계를 수행한다.

3. 제어기 설계

3.1 반력모멘트 관측기(Reaction Moment Observer, RMO)의 설계

식(2)에 주어진 첫 번째 경계조건으로부터 모터와 허브의 관성을 포함하는 I_H 의 계산 값이 실제관성의 크기와 같으며, 정확한 모터 정수를 알고 있어서 τ_m 의 값을 오차 없이 모니터링 할 수 있다는 가정을 도입하면, 반력모멘트를 추정하기 위해 다음과 같은 반력모멘트 관측기를 유도할 수 있다.

$$M_r(T) = I_H \ddot{\theta}(T) - \tau_m(T - \delta) \quad (3)$$

식(3)에 주어진 바와 같이 현재시간 T 에서 허브에 작용하는 반력모멘트 $M_r(T)$ 는 한 스텝 이전의 샘플링 시간에 저장된 모터의 제어입력 토크 $\tau_m(T - \delta)$ 과 현재시간의 모터를 포함한 허브의 관성력을 측정하여 예측할 수 있다. 한편, 다음과 같이 컷-오프(cut-off) 주파수가 λ 인 1 차의 저주파 통과필터를 이용하면 유연 매니플레이터의 진동에서 가장 지배적인 첫 번째 진동모드만을 고려하여 되먹임을 위한 반력모멘트 $M_r(t)$ 을 추정할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{\xi}(t) &= -\lambda \xi(t) + M_r(t) \\ M_r(t) &= \lambda \xi(t) \end{aligned} \quad (4)$$

이러한 저주파 통과필터를 사용함으로써, 노이즈의 영향과 가속도를 구하기 위해 두 번의 미분을 수행하는 과정에서 불연속하게 얻어진 측정값에 의해 증폭되는 신호의 영향을 감소시켜 보다 부드러운 제어입력을 얻을 수 있다. 그러나, 지나치게 낮은 컷-오프 주파수를 설정할 경우 실제 반력모멘트 값과의 위상차가 발생하여 제어 성능 악화를 가져올 수 있으므로 적절한 주파수의 선정이 중요하며 본 연구에서는 해석적 방법에 의해 도출한 유연 매니플레이터의 1 차 진동 모드를 고려하여 30rad/s 를 사용하였다.

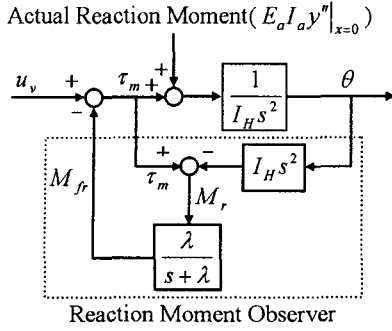


Fig. 2 The proposed reaction moment observer

Fig.2 는 본 연구에서 제안한 반력모멘트 관측기의 구조를 도시한 것이며 여기서 제어입력 $u_v(t)$ 는 강제모드만을 고려하여 설계된 슬라이딩 모드 제어기로부터 결정되는 제어입력을 의미한다. 또한, 제안된 반력모멘트 관측기의 구조를 통해 외란관측기의 형태와 동일한 구조를 가짐을 확인할 수 있다^[3]. 즉, 유연 로봇 팔의 진동에 의해 발생하는 반력모멘트는 모터의 입장에서 볼 때 물리적으로 제어입력에 가해지는 외란성분에 해당하므로 주어진 경계조건으로부터 유도된 반력모멘트 관측기가 일반적으로 사용되고 있는 외란관측기와 같

3.2 강제모드 슬라이딩 모드제어기 설계

유연 로봇 팔에서 발생하는 진동의 영향을 고려하지 않고 로봇 팔의 관성만을 포함하여 유연 매니퓰레이터의 강제모드를 제어하기 위한 슬라이딩 모드 제어기를 설계하였다. 이와 같이 강제모드만을 고려하여 제어기를 설계할 경우 단순한 로봇 동역학을 고려하여 1 차의 슬라이딩 평면으로 제어기 설계가 가능하며 분산화된 제어구조를 갖도록 할 수 있다^[4].

유연 매니퓰레이터의 강제모드만을 고려한 슬라이딩 모드 제어기를 설계하기 위해 다음과 같은 1 차의 슬라이딩 평면을 고려한다^[5].

$$\begin{aligned} s(t) &= c_1 e(t) + c_2 \dot{e}(t) \\ &= c_1 (\theta - \theta_d) + c_2 (\dot{\theta} - \dot{\theta}_d), \quad c_1, c_2 > 0 \end{aligned} \quad (5)$$

식(5)에 주어진 슬라이딩 평면에 대해 슬라이딩 모드 존재조건 $s(t)\dot{s}(t) < 0$ 를 만족하는 제어입력 $u_v(t)$ 는 다음과 같이 결정된다.

$$\begin{aligned} u_v(t) &= u_{eqv}(t) - k \cdot sat(s(t)) \\ &= -\frac{c_1(I_H + I_b)}{c_2} \dot{\theta}(t) - k \cdot sat(s(t)) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\text{여기서, } sat(s(t)) = \begin{cases} s(t)/|\varepsilon| & |s(t)| \leq \varepsilon \\ \text{sgn}(s(t)) & |s(t)| > \varepsilon \end{cases}$$

앞 절에 주어진 식(3)과 식(6)에서 볼 수 있듯이 유연 매니퓰레이터의 선단의 위치제어를 위해 본 연구에서 제안하는 제어기법이 요구하는 정보는 오직 모터에 부착된 엔코더(encoder)로부터 측정된 각 변위뿐임을 알 수 있다.

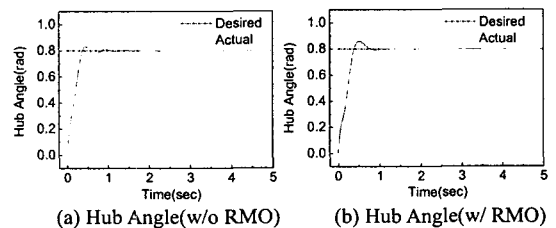
전술한 바와 같이 반력모멘트의 추정 값에 근거하여 유연 로봇 팔에 발생하는 진동을 상쇄하기 위한 제어입력과 강제모드만을 고려하여 설계된 슬라이딩 모드 제어입력을 더하면 최종적으로 다음과 같이 유연 매니퓰레이터의 센서리스 진동제어를 위한 제어입력 $u_s(t)$ 을 결정할 수 있다.

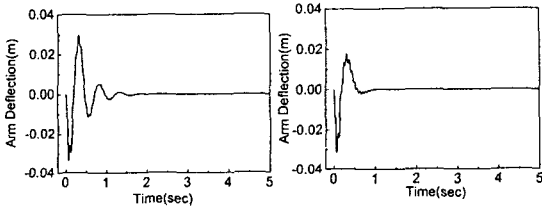
$$u_s(t) = u_v(t) - M_{fr}(t) \quad (7)$$

4. 실험결과 및 토의

4.1 시뮬레이션 결과

Fig.3 는 반력모멘트 관측기를 이용한 센서리스 진동제어의 성능을 검증하기 위해 실제 실험에 앞서 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하고 그 결과를 도시한 것이다. Fig.3(a)와 (b)는 각각 강제모드만을 고려하여 제어한 경우와 반력모멘트 관측기를 이용하여 유연 로봇 팔의 진동까지 함께 제어한 경우 허브의 각 변위를 나타낸다. 두 경우 모두 정상상태 오차 없이 요구위치에 빠르게 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 한편, 반력모멘트 관측기를 이용한 경우 강제모드 제어 이외에 추가적인 제어입력이 더해지므로 약간의 오버슈트가 발생하였으나 로봇팔의 진동이 빠르게 억제되면서 허브의 각변위 역시 빠르게 요구위치로 정착하는 것을 볼 수 있다. Fig.(c)와 (d)는 각각 유연 로봇 팔에서 발생하는 진동을 도시한 것이다. Fig.(d)에 나타난 바와 같이 본 연구에서 제안된 방법을 이용하여 유연 매니퓰레이터의 센서리스 제어를 수행한 결과 로봇 구동 시 발생하는 진동의 효과적인 억제가 가능함을 알 수 있다.

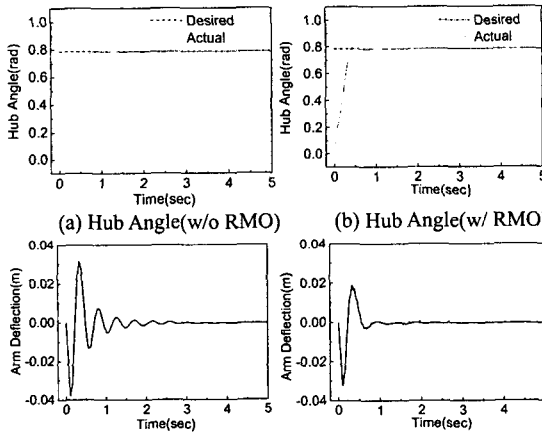




(c) Arm Deflection(w/o RMO) (d) Arm Deflection(w/ RMO)
Fig. 3 Simulation results of the proposed controller

4.2 실험 결과

Fig.4 는 제안된 제어기법을 이용하여 실험을 수행한 결과를 도시한 것이며 앞 절의 컴퓨터 시뮬레이션 결과와 유사한 결과를 확인할 수 있다. 특히, Fig.4(d)에 나타난 바와 같이 반력모멘트 관측기로부터 얻은 반력모멘트 정보를 되먹임 한 경우 허브의 회전운동 중 뿐만 아니라 요구위치 정착 후에 지속되는 잔류진동 또한 매우 빠른 시간 내에 억제되는 것을 확인할 수 있다.



(a) Hub Angle(w/o RMO) (b) Hub Angle(w/ RMO)
(c) Arm Deflection(w/o RMO) (d) Arm Deflection(w/ RMO)
Fig. 4 Experimental results of the proposed controller

5. 결론

본 연구에서는 유연 매니플레이터의 위치제어 시 필연적으로 수반되는 진동의 효과적인 제어를 위해 반력모멘트 관측기를 제안하고 이를 이용한 센서리스 진동제어를 구현하였다.

유연 매니플레이터의 운동 경계조건으로부터 유도된 반력모멘트 관측기는 결국 일반적인 외란관측기의 형태로 정리될 수 있음을 확인하였다. 또한, 제어알고리즘을 보다 쉽게 설계하고 효과적으로 적용하도록 강체모드만을 고려한 슬라이딩 모드제어를 설계하고 이를 반력모멘트 관측기와 연계함으로써 분산화된 제어방법을 제시하였다.

제안된 제어 방법의 성능을 검증하기 위해 컴퓨터 시뮬레이션 및 실험을 수행하였으며, 그 결과 유연 로봇 팔에 진동측정을 위한 센서를 사용하지 않고 모터에 부착된 엔코더의 각 변위 신호만을 이용하여 유연 매니플레이터의 센서리스 진동제어가 가능함을 입증하였다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (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) 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.
- (4) 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.
- (5) 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.