

외란 관측기를 이용한 직접 구동형 로봇의 고속·고정도 제어

High Speed and Accurate Positioning Control of Robot Manipulator by Using Disturbance Observer

서일홍, 엄광식, °권기호

한양대학교 전자공학과(Tel : 0345-400-5172, Fax : 0345-408-5803, E-mail: ihsuh@shira.hanyang.ac.kr)

Abstracts High-speed/high-accuracy control of robot manipulator becomes more and more stringent because of the external disturbance and nonlinear characteristics. To meet this ends, lots of control strategies were proposed in the past such as the computed torque control, the nonlinear decoupled feedback control, and adaptive control. These control methods need computations of the inverse dynamics and require much computational effort. Recently, a disturbance observer with unmodeled robot dynamics and simple algorithms to motion control have been widely studied. This paper proposes a motor control strategy based on the disturbance observer which estimate the disturbance of each joint from input-output relationship of the actuator and eliminate the estimated disturbance including the torque due to modeling errors, coupling force, nonlinear friction, and so on. To apply the disturbance observer to closed-loop system like velocity servo pack, the modified control structure was constructed and shown that it is equivalent to a disturbance observer in open-loop system. Finally, using the proposed approach, simulation and experiments were carried out for a two-degree-of-freedom SCARA type direct drive robot, and show some results to verify the effectiveness of the proposed algorithms.

Keywords Robot control, Disturbance Observer, Closed-Loop Servo Pack

1. 서론

로봇 매니플레이터를 원하는 위치에 정확하게 위치 하도록 하는 제어 문제는 로봇의 비선형적 특성과 각 축간의 상호 간섭 효과로 인하여, 선형 시스템에 적용되는 PID 제어기와 같은 간단한 제어 알고리즘으로 제어 하기가 어렵다. 특히, 이러한 문제는 로봇이 고속으로 운동하거나 정밀도를 요하는 작업에서 제어기의 성능을 저하시킬 수 있다. 정밀한 로봇 운동을 구현 하기 위해서 로봇 제어기는 로봇 파라미터의 불확실성(Uncertainty)과 부하(Payload) 변동에 대해 둔감하고, 각 축의 상호 간섭 작용에 영향을 적게 받으며, 제어 알고리즘이 온라인으로 계산할 수 있도록 설계되어야 한다.

지금까지 로봇의 비선형적 특성을 보상하기 위해서 제안된 제어 알고리즘은 크게 Computed Torque Control, Sliding Mode Control, Adaptive Control 등으로 구분 할 수 있다. Computed Torque Control 알고리즘은 로봇의 정확한 모델을 기초로 하고 있어서 로봇의 모델을 정확히 알아야 하며, 복잡한 로봇 운동 방정식을 풀어야 하는 단점이 있으며, Adaptive Control 알고리즘은 제어기의 파라미터를 조정하는 알고리즘이 매우 복잡하여, 많은 연산이 필요로 한기 때문에 실제 적용이 어렵다. 따라서, 산업용 로봇에서는 대부분 연산이 적은 선형 제어 알고리즘에 의존하고 있다.

최근에는 적은 연산과 정확한 로봇의 모델링 없이 로봇의 비선형적 특성을 보상하기 위해서 외란 관측기[1,2,3]에 기초를

둔 제어 알고리즘이 제안되었다. 이 제어 방법은 로봇을 선형적으로 모델링하고 선형적 특성과의 오차 및 로봇의 비선형적 특성을 외란으로 간주하여 외란 관측기에 의해서 생성하여 보상해 주는 것으로 구현 시 복잡한 계산 없이 외란을 생성할 수 있는 장점이 있다.

본 논문에서는 복잡한 연산 없이 로봇의 비선형적 특성을 보상하기 위해 외란 관측기를 이용한 로봇 제어기를 설계하는 방법을 제안한다. 특히, 로봇의 각 축을 주파수 응답을 통해 실험적으로 구하고, 이를 토대로 선형화된 모델을 계산하여 외란 제어기를 설계한다. 설계된 외란 관측기에서 로봇의 역모델을 구현하기 위한 필터의 설정 방법과 외란 관측기에 의한 외란 특성을 분석하고자 한다. 또한, 토크 서보가 아닌 일반적인 페루프 시스템에서의 외란 관측기의 적용법을 제안하였으며, 제안된 제어기의 성능을 보이기 위해 동역학 특성이 잘 나타나는 2 자유도 직접 구동형 로봇에 대해 제어기를 구성하여 적용하므로써 그 효용성을 보이고자 한다.

2. 외란 관측기

2.1 로봇 모델링

n 자유도를 가진 로봇 매니플레이터의 운동 방정식은 식 (1)과 같이 비선형 방정식으로 표현된다[4].

$$M(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) + F(\dot{\theta}) = \tau \quad (1)$$

여기서, $M(\theta)$ 는 $n \times n$ 관성 행렬이고, $C(\theta, \dot{\theta})$, $G(\theta)$, $F(\dot{\theta})$ 은 각각 구심 및 원심력, 중력, 점성력을 나타내는 $n \times 1$ 벡터이며, τ 는 로봇의 각 관절에 가해지는 $n \times 1$ 토크 벡터이다. θ , $\dot{\theta}$, $\ddot{\theta}$ 은 각각 관절 위치, 관절 속도, 관절 가속도를 나타내는 $n \times 1$ 벡터이다[5]. 일반적으로, $M(\theta)$, $C(\theta, \dot{\theta})$, $G(\theta)$ 는 θ , $\dot{\theta}$ 의 비선형 함수이며, 각각의 축간의 상호 작용에 의해 각 축을 독립적으로 제어할 때에는 타 관절에 의한 간섭에 의해 여러 가지 문제가 야기될 수 있다.

로봇의 각 축을 독립적으로 제어하기 위해서 각 관절을 독립된 선형 시스템과, 각 축간의 간섭 효과, 비선형 성분으로 이루어진 외란 토크로 식 (2)와 같이 모델링한다.

$$\hat{M}_{ii}\ddot{\theta}_i + \tau_{di}(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}) = \tau_i \quad (2)$$

여기서,

$$\tau_{di} = \sum_{j=1, j \neq i}^n M_{ij}\ddot{\theta}_j + \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n C_{ijk}\dot{\theta}_j\dot{\theta}_k + G_i + F_i + (M_{ii} - \hat{M}_{ii})\ddot{\theta} \quad (3)$$

이며, \hat{M}_{ii} 는 로봇 자세의 함수인 $M_{ii}(\theta)$ 의 근사치 값으로 상수로 정해진 값이다. 따라서, 모델링 오차 $M_{ii}(\theta) - \hat{M}_{ii}$ 가 외란 토크 관계식에 포함된다.

실험적으로 \hat{M}_{ii} 를 로봇에 대한 주파수 응답을 통해서 근사적으로 구할 수 있으며, 그림 1은 실제로 스카라형의 로봇의 2축에 대한 주파수 응답을 구한 것으로 로봇의 주파수 특성은 선형적 특성을 갖지 않는 것을 알 수 있으며, 이그림을 통해 근사적으로 선형화된 모델을 구하기 위하여 \hat{M}_{22} 를 구하면 약 $0.1[Kgm^2]$ 임을 알 수 있다.

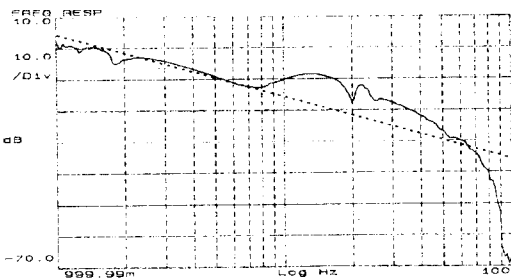


그림 1. 스카라형의 로봇의 주파수 응답 (2축)
Fig. 1. Frequency Response of SCARA Robot Manipulator(2nd Axis)

2.2 외란 관측기

식 (2)에서 외란 항인 $\tau_{di}(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta})$ 가 완전히 제거된다면, 로봇의 제어 문제는 선형 시스템의 제어 문제로 간략화 될 수 있다. 그림 2는 일반적인 서보 제어 시스템과 식 (2)를 도식적으로 표현한 것이다. 그림 2에서 $C_p(s)$ 와 $C_v(s)$ 는 각각 위치

제어기와 속도 제어기이다.

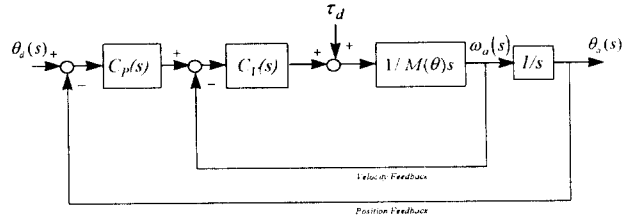


그림 2. 전형적인 서보 제어 시스템
Fig.2. Typical Servo Control System

식 (2)의 외란을 관측하여 제거하기 위해, 그림 3과 같이 외란 관측기를 설계한다. 여기서 $P(s)$ 는 실제 플랜트의 전달 함수로 $1/M(\theta)s$ 이며, $P_n(s)$ 는 모델링된 플랜트의 전달 함수로 $1/\hat{M}s$ 이다. 외란 관측기는 플랜트의 모델링을 기초로 하는 것으로, 실제로 플랜트의 전달 함수를 알 수는 없으므로 모델링 오차도 외란으로 간주한다.

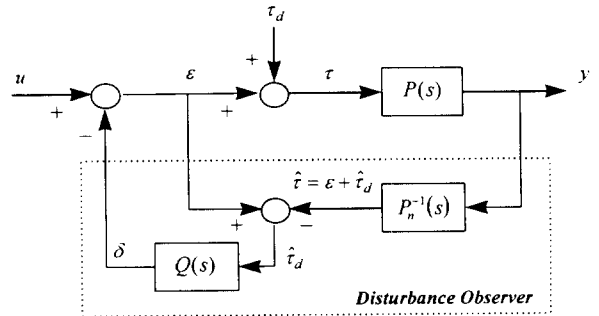


그림 3. 외란 관측기의 블럭도
Fig.3. Block Diagram of Disturbance Observer

그림 3의 외란 관측기 기본 개념은 실제로 시스템의 역모델을 구현할 수 없으며, 시스템 측정 신호의 노이즈에 의해 성능을 저하시킬 수 있기 때문에, 그림 3의 저역역 통과 필터 $Q(s)$ 를 사용하며, 실제로 외란 관측기의 성능은 $Q(s)$ 에 의해 좌우된다. 그림 3의 블럭도에서 시스템의 출력 y 는 식 (4)와 같이 구할 수 있다.

$$y = G_{uy}(s)u + G_{\tau_d y}(s)\tau_d \quad (4)$$

여기서,

$$G_{uy} = \frac{P(s)P_n(s)}{P_n(s) + (P(s) - P_n(s))Q(s)} \quad (5)$$

$$G_{\tau_d y} = \frac{P(s)P_n(s)(1 - Q(s))}{P_n(s) + (P(s) - P_n(s))Q(s)} \quad (6)$$

이다. 만약, $Q(s) \approx 1$ 인 경우에는 식 (5), (6)으로부터

$$G_{uy}(s) \approx P_n(s), \quad G_{\tau_d y}(s) \approx 0 \quad (7)$$

이 된다. 따라서, 외란 보상기가 실제 플랜트를 모델링된 플랜트로 만들고 저주파 성분의 외란 토크는 제거되므로 이것이 시스템을 강건하게 한다. $Q(s) \approx 0$ 인 경우에는

$$G_{ry}(s) \approx P(s), \quad G_{\tau_d}(s) \approx P(s) \quad (8)$$

임을 알 수 있다. 그러므로, 저주파 영역에서는 모델링 오차와 외란 토크를 제거하기 위해 $Q(s) \approx 1$ 이 되도록 하고 고주파 영역에서는 센서 노이즈를 제거하기 위해 $Q(s) \approx 0$ 이 되도록 한다. 시스템의 역 모델을 구현 가능 하도록 하기 위해서 $Q(s)$ 의 상대 차수는 모델링 된 플랜트의 상대 차수 보다 크거나 같도록 정하고, 좋은 외란 억압 성능을 얻기 위해서는 저주파 영역에서 $|1 - Q(j\omega)|$ 의 값이 작아야 한다[3]. 하지만, $|1 - Q(j\omega)|$ 을 작게 하면 $|Q(j\omega)|$ 의 기울기가 작아지게 되고 결국 센서 노이즈에 의해 시스템의 강건성을 떨어 뜨리는 결과를 초래한다. $G_{ry}(s)$ 의 이득 특성은 모델링 된 플랜트와 실제 플랜트의 차이로 인해 $Q(s)$ 의 절점 주파수에서 변화하고 이로 인해 위상 변화가 일어나게 되므로, 전체 시스템은 $Q(s)$ 의 시정수에 의해 불안정한 특성을 나타낼 수 있다. 따라서, $Q(s)$ 의 시정수는 개루프의 절점 주파수를 피해서 선정해야 한다.

3. 페루프 시스템에서의 외란 관측기 적용 방법

로봇의 서보 시스템이 속도 지령을 주도록 되어 있고, 내부적으로 속도 제어가 행해지고 있는 페루프 시스템에서의 외란 관측기는 그림 4 와 같이 구성되며, 이 그림에서 $C(s)$ 와 $C_n(s)$ 는 각각 실제 속도 제어기와 모델링된 속도 제어기이다. 그림 4 로부터 로봇의 운동 속도는 다음 식과 같이 구해진다.

$$y = G_{ry}(s)r + G_{\tau_d}(s)\tau_d, \quad (9)$$

$$G_{ry}(s) = \frac{P_n(s)C_n(s)P(s)C(s)}{P_n(s)C_n(s)[P(s)C(s) - Q(s) + 1] + P(s)C(s)Q(s)}, \quad (10)$$

$$G_{\tau_d}(s) = \frac{(1 - Q(s))P_n(s)C_n(s)P(s)}{P_n(s)C_n(s)[P(s)C(s) - Q(s) + 1] + P(s)C(s)Q(s)}. \quad (11)$$

위의 관계식으로부터 $Q(s) \approx 1$ 인 주파수 영역에서는 식 (12), (13)과 같이 속도 제어기와 플랜트가 모델링 것과 같이 동작되고, $Q(s) \approx 0$ 인 주파수 영역에서는 식 (14), (15)와 같이 실제 속도 제어기와 플랜트의 특성대로 동작함을 알 수 있다.

$$G_{ry}(s) \approx \frac{P_n(s)C_n(s)}{1 + P_n(s)C_n(s)}, \quad (12)$$

$$G_{\tau_d}(s) \approx 0, \quad (13)$$

$$G_{ry}(s) \approx \frac{P(s)C(s)}{1 + P(s)C(s)}, \quad (14)$$

$$G_{\tau_d}(s) \approx \frac{P(s)}{1 + P(s)C(s)}. \quad (15)$$

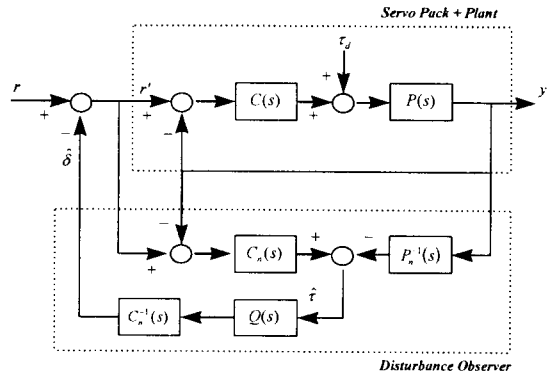


그림 4 페루프 시스템에서의 외란 관측기
Fig. 4. Disturbance Observer in Closed-Loop System

4. 실험 결과

로봇의 비선형적 특성에 대한 외란 관측기의 성능을 보기 위해 스카라형의 2 자유도 직접 구동형 로봇에 대해 실험을 수행하였다. 실험을 위한 시스템은 그림 5 과 같이 실시간 OS(VxWorks)를 이용하여 코드 생성을 하는 32Bit 마이크로 프로세서 보드(FORCE30[6])와 서보 알고리즘 수행을 위한 DSP 보드(TMS320C30), 로봇의 구동을 위한 모터 드라이버로 구성하였으며, 제어를 위한 샘플링 시간은 0.1 [msec]이다.

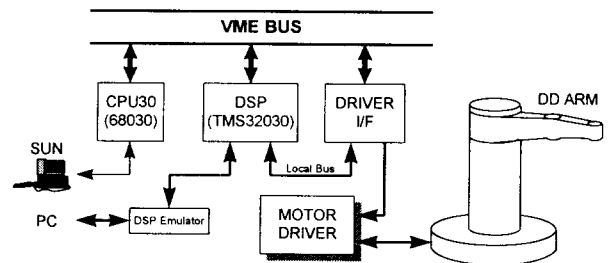
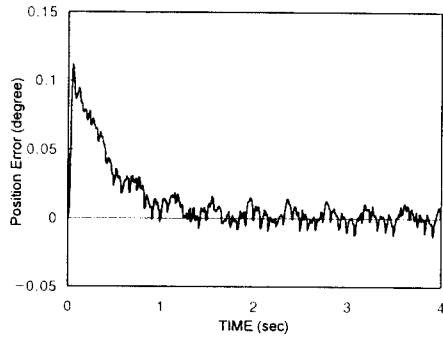
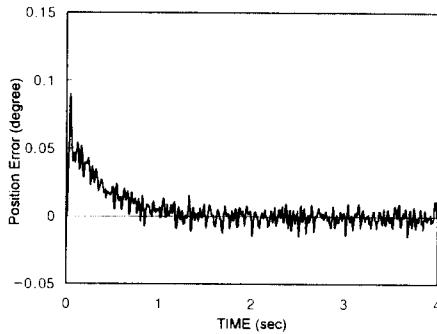


그림 5 실험 환경
Fig.5. Experimental Setup

로봇의 저속 운동 시 나타나는 점성력과 토크 리플에 의한 외란에 대해 외란 관측기의 성능 검토를 위해 로봇을 7.2 [deg/sec]의 저속으로 운동시킬 때의 위치를 관찰하였으며, 그 결과는 그림 6 과 같다. 이 그림에서와 같이 외란 관측기를 사용하지 않은 경우는 저속 운동 시 나타나는 점성력에 의해 위치 오차가 발생하였으며 약 2.5Hz 의 토크 리플 성분이 발생하였으나, 외란 관측기를 사용한 경우 점성력과 토크 리플 성분이 보상되어 위치 오차가 줄어드는 것을 알 수 있다.



(a)

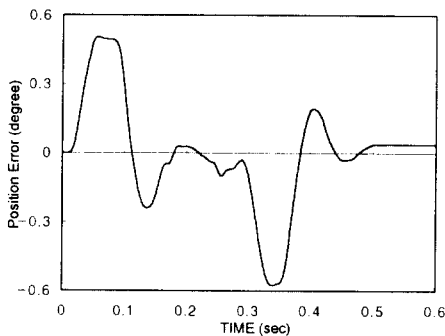


(b)

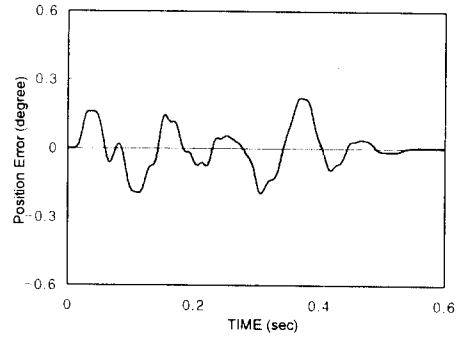
그림 6 저속 운동 시의 위치 오차 (a) 외란 관측기가 없는 경우 (b) 외란 관측기가 있는 경우

Fig.6. Position Error of Low Speed Motion (a) Without Disturbance Observer (b) With Disturbance Observer

한편, 로봇의 고속 운동 시 크게 발생하는 축 간의 간섭 효과에 대한 외란 관측기의 성능을 보기 위해 스카라 로봇의 1축을 180 [deg/sec]의 고속으로 운동시키고, 2축을 위치 제어하였을 때, 1축의 운동에 의한 외란에 대한 2축의 위치 오차를 그림 7에 나타내었다. 1축의 고속 운동 시 특히 운동 시작점과 끝점에서 많은 관성 성분이 2축에 전달되게 되고 외란 관측기에 의해 보상을 하지 않은 경우 운동의 시작과 끝점에서 위치 오차가 약 0.5도 정도 발생하였으나 외란 관측기를 사용한 경우에는 운동의 시작과 끝점에서 1축의 영향을 보상하여 약 0.2도 정도로 줄었다.



(a)



(b)

그림 7 1축 운동 시 2축의 위치 오차 (a) 외란 관측기가 없는 경우 (b) 외란 관측기가 있는 경우

Fig.7. Position Error of 2nd Axis During Motion of 1st Axis (a) Without Disturbance Observer (b) With Disturbance Observer

5. 결론

비선형적 특성을 보이는 로봇 매니퓰레이터의 효과적인 제어를 위해서 외란 관측기를 이용한 로봇 제어를 설계하는 방법을 제안하였다. 로봇의 선형화된 모델을 구하기 위해 각 축을 주파수 응답을 통해 실험적으로 구하는 방법을 보였고, 이를 토대로 외란 관측기를 설계하였다. 특히 토크 서보가 아닌 일반적인 페루프 시스템에서의 외란 관측기의 적용법을 제안하였으며, 제안된 제어기의 성능을 보이기 위해 동역학 특성이 잘 나타나는 2 자유도 직접 구동형 로봇에 대해 제어기를 구성하여 적용함으로써 그 효용성을 보였다.

참고문헌

- [1] K.Ohishi, "A New Servo Method in Mechatronics" Trans. Japanese Society of Electrical Engineering, vol. 107-D, pp. 83-86, 1987
- [2] T.Umeno, T.Kaneko and Y.Hori, "Robust Servo System Design with Two Degrees of Freedom and its Application to Novel Motion Control of Robot Manipulators." IEEE Trans. Industrial Electronics, vol. 40, No 5, pp. 473-485, Oct. 1993
- [3] S. Lee, Robust Digital Tracking Controllers for High-Speed/High-Accuracy Positioning System, Ph.D. Dissertation, U.C Berkeley, 1994
- [4] M.W.Spong and M.Vidyasagar, Robot Dynamics and Control, New York, Wiley, 1989
- [5] Asada, Y. Kanade and I. Takeyama, "Control of a direct-drive arm," ASME J. Dynam. Syst., Meas., Contr., vol. 105, no. 3, pp. 136-142, 1983
- [6] CPU-30 User's Manual, Force Computers Inc., Germany, 1991