

토크센서 기반 유연관절 로봇 팔 제어기 설계

이호선^{***}, 오용환^{**}, 송재복^{*}, 유범재^{**}
고려대^{*} 한국과학기술연구원^{**}

Torque Sensor Based Flexible Joint Robot Arm Controller Design

Hosun Lee^{***}, Yonghwan Oh^{**}, Jae-Bok Song^{*}, Bum-Jae You^{**}
Korea University^{*}, Korea Institute of Science and Technology^{**}

Abstract - 본 논문에서는 유연관절 로봇 팔 제어를 위한 토크센서 기반의 외란에 강인한 제어기 설계를 다루고 있다. 로봇은 관절의 토크센서를 통해 관절에서 발생하는 토크의 측정이 가능하며 외란에 강인한 제어기 설계를 위해 외란 관측기가 적용 되었다. 외란관측기는 시스템에 작용하고 있는 외란을 상쇄하는 역할을 한다. 본 논문에서 설계된 제어기의 성능은 컴퓨터 모의실험을 통하여 확인하도록 한다.

1. 서 론

로봇 기술이 빠르게 발전함에 따라 로봇의 이용은 사회의 여러분야로 확대되었다. 최근에는 서비스 로봇의 개발이 활발해짐에 따라 기존 산업용 로봇에 비해 사람과 더 가까이에서 작업을 수행하게 되면서 로봇의 안전성이 새로운 고려 사항으로 떠올랐다. 로봇의 안전성 확보를 위한 방법 중 하나로 로봇의 각 관절에 토크센서를 체결하여 외력이 측정 가능하도록 하는 방법이 있다. 하지만 로봇 관절에 체결된 토크센서는 유연성(flexibility)이라는 새로운 문제를 가져왔다. 그 문제를 해결하기 위해 피드백 선형화(feedback linearization)[4], 특이 섭동(singular perturbation)[5], 슬라이딩 모드(sliding-mode)[6], 수동성(passivity), 적응(adaptive)기법 등을 이용한 연구들이 활발히 이루어졌다[7]. 하지만 유연관절 제어에 있어서 외란은 여전히 성능은 크게 저하 시키는 요인이다.

본 논문은 외란 관측기(disturbance observer)를 이용한 토크센서(torque sensor)기반의 유연관절 로봇 팔 제어기 설계에 대해 다룬다. 토크센서 기반의 유연관절 로봇은 로봇의 관절에 토크센서가 체결되어 관절에서 발생하는 토크가 측정 가능하다. 설계된 제어기는 토크센서를 통해 피드백 받은 관절 토크를 외란관측기를 통해 외란을 추종하며 외란의 영향을 상쇄시켜 제어기에 입력된 토크를 시스템이 출력하도록 한다.

2. 본 론

2.1 유연관절 시스템 모델

본 논문에서 다루어질 유연관절 로봇의 시스템 모델은 [1]에서 제안되었으며 다음의 식으로 표현할 수 있다.

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) = \tau \tag{1}$$

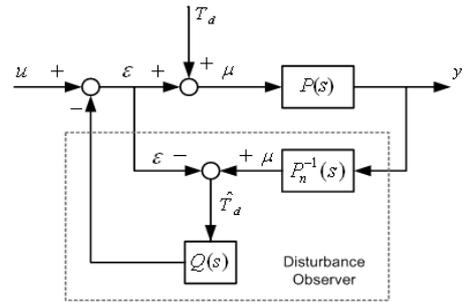
$$B\dot{\theta} + \tau = \tau_m \tag{2}$$

$$\tau = K(\theta - q) \tag{3}$$

여기서, q 는 링크 위치 벡터이고, θ 는 모터의 위치 벡터이다. 모터와 링크 사이에 발생하는 토크는 벡터 τ 이다. 식(1)은 대칭이고 양확정행렬(positive definite)인 질량 행렬 $M(q)$ 과 코리올리(Coriolis)와 구심력에 의한 토크 벡터 $C(q, \dot{q})$, 중력에 의해 발생하는 토크 벡터 $g(q)$ 를 포함하고 있다. B 와 K 는 각 관절의 모터 관성(inertia)과 강성(stiffness)을 포함하고 있는 대각행렬이며, τ_m 은 모터의 출력 토크 벡터로 시스템을 제어하는 입력 변수이다.

2.2 외란 관측기

외란 관측기는 [2]에서 처음으로 제안 되었으며, 기본 개념은 <그림 1>을 통해 볼 수 있다. 외란관측기는 플랜트 $P(s)$ 에 입력되는 실제 입력 토크 ϵ 과 가정된 플랜트의 역(inverse) $P_n^{-1}(s)$ 에서의 출력 토크 μ 사이의 차이를 가정된 플랜트 $P_n(s)$ 에 작용하고 있는 등가 외란 \hat{T}_d 로 간주한다. 이때 실제 플랜트와 정확히 같은 플랜트를 가정하기는 불가능하다. 하지만 플랜트의 불확실성 역시 외란으로 간주되어 등가 외란에 포함 되어있다. 이렇게 구해진 등가의 외란은 저역 통과 필터 $Q(s)$ 를 통해 실제 외란 T_d 를 소거하기 위해 피드백된다. 여기서 저역 통과 필터



<그림 1> 외란 관측기의 기본 개념

(low pass filter) $Q(s)$ 는 측정된 토크 신호의 고주파 노이즈를 감소시키고 구현 불가능한 가정된 플랜트의 역을 구현 가능하게 한다. 이러한 방법을 통해 설계자는 설계한 주파수 영역 안에서 필터 처리된 등가의 외란을 보상하여 플랜트에 작용하는 모든 외란을 소거할 수 있다.

2.3 제어기 설계

식 (1), (2), (3)에 따라 <그림 2>와 같은 1축 유연관절 로봇은 다음의 식으로 표현할 수 있다.

$$\tau = J_l \ddot{q} + mgl \sin q \tag{4}$$

$$\tau_m = J_m \ddot{\theta}_m + b_m \dot{\theta}_m + \frac{\tau}{r} + \rho_m \tag{5}$$

$$\tau = k_s \left(\frac{\theta_m}{r} - q \right) \tag{6}$$

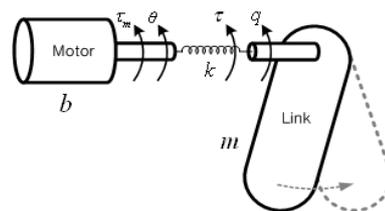
여기서 q 와 θ_m 은 링크의 위치와 모터의 위치를 가리키며 τ 는 모터에서 링크로 전달되는 토크로 토크센서를 통해 측정되는 값이다. 그리고 J_l 는 링크의 관성, J_m 은 모터의 관성, m 은 링크의 중량, g 는 중력가속도, l 은 링크의 길이, b_m 은 모터의 마찰력, r 은 모터와 링크 사이의 기어비, ρ_m 은 모터에 작용하는 외란, k_s 는 탄성계수, τ_m 은 모터의 출력 토크를 나타낸다.

주어진 식 (4), (5), (6)을 바탕으로 토크 제어를 위한 τ_m 과 τ 를 입력과 출력으로 하는 시스템을 다음과 같이 재정의 할 수 있다.

$$\ddot{\tau} + a\tau + \rho = b\tau_m \tag{7}$$

여기서

$$a = k_s \left(\frac{1}{r^2 J_m} + \frac{1}{J_l} \right), \quad b = \frac{k_s}{r J_m} \tag{8}$$



<그림 2> 유연 관절 로봇

그리고

$$\rho = \frac{k_s}{rJ_m}(b_m\dot{\theta}_m + \rho_m) - \frac{k_s}{J_l}mgl\sin\theta \quad (9)$$

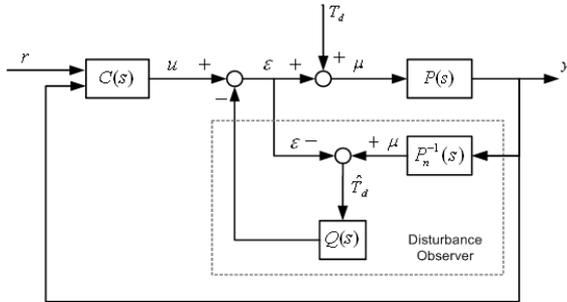
이제 유연관절 로봇 (7)의 외란 ρ 를 소거하기 위해 외란관측기를 이용한 전통적인 피드백 제어 기법을 적용한다. 외란 관측기 설계를 위해 식 (7)로부터 플랜트 $P_n(s)$ 를 다음과 같이 가정한다.

$$P_n(s) = \frac{k_s}{rJ_m} \frac{1}{s^2 + k_s \left(\frac{1}{r^2 J_m} + \frac{1}{J_l} \right)} \quad (10)$$

지역 통과 필터 $Q(s)$ 는 [3]에서 제안된 Binomial 필터를 사용하여 다음과 같은 형태로 구성하였다.

$$Q(s) = \frac{1 + \sum_{k=1}^{N-r} a_k (\tau s)^k}{1 + \sum_{k=1}^N a_k (\tau s)^k} \quad (11)$$

가정된 플랜트 $P_n(s)$ 와 지역 통과 필터 $Q(s)$ 를 가지고 <그림 3>과 같은 외란 관측기를 이용한 제어를 설계하였다. 블록 $C(s)$ 는 시스템의 출력 토크가 입력 토크를 따라가도록 하는 PD제어기이다.



<그림 3> 유연 관절 로봇 팔 제어기 구조

2.4 컴퓨터 모의실험 결과

앞에서 설계된 제어를 이용하여 유연관절 로봇을 제어하는 컴퓨터 모의실험을 하였다. 모의실험에서 사용된 파라미터는 <표 1>과 같다.

<표 1> 모의실험에 사용된 파라미터

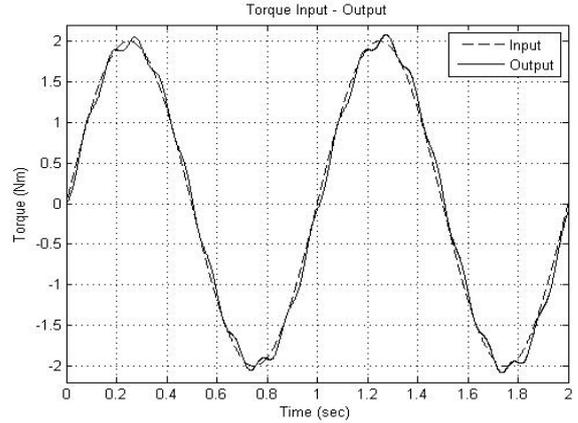
파라미터	값	단위
k (탄성계수)	114	[kNm/rad]
M (링크의 질량)	5	[kg]
r (기어비)	300	-
L (링크 길이)	0.5	[m]
J_l (링크의 관성)	0.4167	[kgm ²]
J_m (모터의 관성)	0.004	[kgm ²]
b_m (모터의 마찰계수)	0.001	-
g (중력 가속도)	9.81	[m/s ²]
N (Q-필터의 분모 차수)	3	-
$N-r$ (Q-필터의 분자 차수)	1	-
τ (Q-필터의 시간 상수)	0.002	[sec]

이때 유연관절 로봇이 추적하고자 하는 토크 궤적은 다음과 같다.

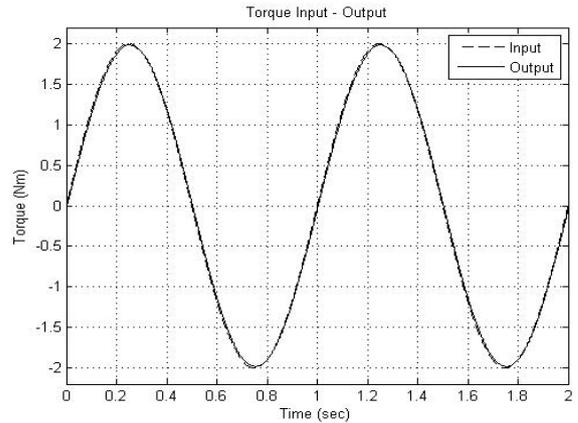
$$\tau_d = 2\sin(2t) \quad (11)$$

또한 시스템은 각 주파수가 10πrad/sec이고 진폭이 30인 외란의 영향을 받고 있다고 가정하였다.

<그림 4>는 외란관측기가 포함되지 않은 PD제어를 이용한 로봇의 제어 결과이다. 점선은 입력된 토크 궤적을 나타내고 실선은 실제 제어 결과를 나타낸다. 시스템의 출력이 외란의 영향을 받아 입력 토크 궤적



<그림 4> PD 제어를 이용한 모의실험 결과



<그림 5> PD + 외란관측기 제어를 이용한 모의실험 결과

과 차이가 나는 것을 확인할 수 있다. <그림 5>는 외란관측기가 포함된 설계된 제어기의 결과이다. 점선은 입력된 궤적을 나타내고 실선은 실제 제어 결과를 나타낸다. 이 결과에서는 시스템의 출력이 외란의 영향을 받지 않고 입력 받은 토크 궤적을 따라가는 것을 확인할 수 있다.

3. 결 론

유연관절 로봇의 제어기 설계에 있어서 외란은 제어기 성능에 직접적인 영향을 미친다. 본 논문에서는 외란관측기를 이용한 토크센서 기반의 유연관절 로봇 팔 제어를 설계하였다. 관절 토크를 피드백 받아 시스템에 작용하는 외란을 추정하는 외란 관측기를 설계하였고 제어기에 적용하여 전체 로봇 시스템이 외란에 강인하도록 제어성능을 향상시켰다. 또한 그 성능은 컴퓨터 모의실험을 통해 확인하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] M. Spong, "Modeling and control of elastic joint robots", Trans. ASME J. Dynamic Syst. Meas. Contr., 109, 1987.
- [2] M. Nakao, K. Ohnishi, K. Miyachi, "A robust decentralized joint control based on interference estimation", in Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, 326-331, 1987.
- [3] Umeno, Y. Hori, "Robust speed control of DC servomotors using modern two degrees-of-freedom controller design", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 38, No. 5, 179-188, 1990
- [4] R. Marino, M. Spong, "Nonlinear control techniques for flexible joint manipulators: a single link case study", in Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, 1030-1036, 1986
- [5] P. V. Kokotovic, H. K. Khalil, J. O'Reilly, "Singular perturbation method in control analysis and design", Society for Industrial Mathematics, 1993
- [6] J. Hernandez, J. Barbot, "Singular perturbation method in control analysis and design", Society for Industrial Mathematics, 1993
- [7] B. Brogliato, R. Ortega, R. Lozano, "Global tracking controllers for flexible-joint manipulators: a comparative study", Automatica, 31, 41-956, 1995