

내부 모델 기반 외란 관측기를 이용한 수직 1축 머니플레이터의 속도 제어기 설계

Design of a Speed Controller for Vertical One-Link Manipulator Using Internal Model-based Disturbance Observer

이 초 원* · 김 인 혁* · 손 영 익*
(Cho-Won Lee · In Hyuk Kim · Young Ik Son)

Abstract - This paper deals with a robust speed control problem of a vertical one-link manipulator in the presence of parameter uncertainties and unknown input disturbance. Uncertain load weight causes an additional sinusoidal disturbance in the rotation of the link. In order to improve the robustness against parameter uncertainties and external input disturbances, this paper employs an internal model-based disturbance observer approach. Comparative computer simulations are performed to test the performance of the proposed controller. The simulation results show the enhanced performance of the proposed method.

Key Words : One-Link Manipulator, Parameter Uncertainty, Sinusoidal Disturbance, Disturbance Observer

1. 서 론

산업용 머니플레이터는 다양한 작업 환경에서 정밀한 제어 성능이 요구된다. 본 논문에서는 지면에 수직으로 회전 하는 머니플레이터의 속도 제어기 설계 문제를 다룬다. 부하 변동에 따른 파라미터 불확실성과 중력에 의한 정현파 외란은 속도 제어 성능을 저하시킬 수 있다. 이를 해결하기 위해 기구적으로 중력 보상기나 Feedback Linearization Controller(FLC)를 통한 비선형 항의 소거 연구가 진행되고 있다[1][2]. 하지만 중력 보상기를 통한 방법은 제작 및 유지보수 비용이 발생하고, 소거를 통한 방법은 파라미터 불확실성에 대한 추가적인 고급 제어 기법들의 구현이 필요하다.

본 논문에서는 구현이 복잡한 강인 제어 기법 대신 외란 관측기에 기반한 제어기를 설계한다[3-6]. 파라미터 불확실성 및 정현파 외란에 효과적으로 대처하기 위해 내부 모델의 원리를 적용한 외란 관측기를 도입한다[7]. 간단한 제어기 구현을 위해 1차 공칭 시스템을 사용하고 주 제어기로 PI 제어기를 설계한다. 제어에 필요한 속도 정보는 불확실성 및 외란에 강인한 PI 관측기로 추정한다[2].

제안하는 제어기의 성능 확인을 위해 FLC와 기존의 일반적인 외란 관측기(QDOB) 기반 제어기를 모의실험으로 비교한다. 등가 외란 전달함수 보드선도를 이용해 개선된 제어 성능을 분석한다. 본 논문에서는 기존의 일반적인 Q-필터를 사용한 외란 관측기를 QDOB라 부르며, 내부 모델의 원리를 적용한 Q-필터 기반 외란 관측기를 IM-QDOB라 지칭한다.

2. 시스템 모델과 외란 관측기

2.1 시스템 모델

본 논문에서는 지면에 수직으로 회전하는 1축 머니플레이터의 속도 제어 문제를 다룬다. 구동부는 DC 모터, 입력 u 는 인가 전압이며, 측정 가능한 출력은 모터 각도(θ)이다.

$$\begin{aligned} \dot{\theta} &= \omega \\ \dot{\omega} &= -\frac{B_m}{J_t}\omega + \frac{K_t}{J_t}i - \frac{MgL}{J_t n} \sin\left(\frac{\theta}{n}\right) - \frac{\Delta}{J_t} \\ \dot{i} &= -\frac{K_b}{L_a}\omega - \frac{R_a}{L_a}i + \frac{1}{L_a}u. \end{aligned} \quad (1)$$

위 식에서 $J_t = J_m + J_L$ 이고, J_m 과 $J_L = ML^2/n^2$ 은 각각 모터와 기어 및 부하에 의한 관성 질량이다(M : 질량, L : 링크 길이, n : 기어 비). B_m 은 마찰 계수, L_a 과 R_a 는 모터의 인덕턴스와 저항, K_t 는 토크 상수, K_b 는 역기전력 상수이고, Δ 는 느리게 변하는 미지의 외란이다[3-5].

* Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Myongji University, Korea.

E-mail: sonyi@mju.ac.kr

* Dept. of Electrical and Engineering, Myongji University, Korea.
Received : December 12, 2014; Accepted : April 02, 2015

2.2 외란 관측기

외란 관측기는 외란과 파라미터 불확실성의 영향을 보상하기 위해 사용된다[3-5]. 그림 1에서 P 는 실제 시스템, P_n 은 공칭 시스템, C 는 공칭 시스템에 대해 설계된 주 제어기, Q 는 저주파 통과 필터인 Q-필터이다[4]. 일반적으로 다음 절에서와 같이 상대차수가 1인 경우에는 아래와 같이 간단한 Q-필터를 생각할 수 있다(시정수: τ_1).

$$Q(s) = \frac{1}{\tau_1 s + 1} \quad (2)$$

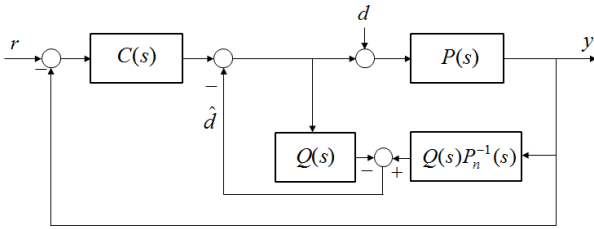


그림 1 외란 관측기 기반 제어기 구조
Fig. 1 Structure of disturbance observer based controller

외란이 존재하는 저주파 영역에서 $Q(s) \cong 1$ 이므로 출력에서 외란의 영향이 제거되고 아래 식과 같이 주 제어기와 공칭 시스템에 의한 페루프 성능을 확보할 수 있다.

$$Y(s) \cong \frac{P_n C}{1 + P_n C} R(s) \quad (3)$$

3. 제안하는 제어기

3.1 PI 속도 제어기 설계

본 논문에서 사용하는 주 제어기는 1차로 근사한 공칭 시스템에 대한 PI 제어기이다. 근사를 위해 전기 시스템의 동특성을 무시하고 마찰 항을 외란에 포함시켜 생각한다[6]. 식 (1)에서 회전 부하로 인한 비선형 항 $(MgL/n)\sin(\theta/n)$ 과 외란 Δ 를 하나의 외란으로 처리하면 입력에서 속도까지 공칭 전달함수는 아래 식과 같다 (J_n 은 J_t 의 공칭 값).

$$\frac{\Omega(s)}{U(s)} = \frac{K_t}{J_n R_n s + K_t K_b} \quad (4)$$

PI 제어기의 이득 $K_p = (\omega_s J_n R_n) / K_t$ 와 $K_i = \omega_s K_b$ 라면 속도 페루프 식은 아래와 같다(ω_s : 페루프 대역폭).

$$\frac{\Omega(s)}{\Omega^*(s)} = \frac{\omega_s}{s + \omega_s} \quad (5)$$

실제 시스템과 공칭 시스템의 차이 및 추가적인 불확실성과

정현파 외란은 내부 모델 기반 외란 관측기로 보상한다.

3.2 내부 모델 기반 외란 관측기(IM_QDOB) 설계

IM_QDOB는 일반적인 외란 관측 기능에 더하여 내부 모델 원리에 따라 추가적인 시변 외란을 보상한다[7]. 본 논문에서 외란은 느리게 변하는 외란 Δ 및 정현파 외란을 포함하고, 정현파 외란의 각주파수(ω_d)는 링크의 각속도(ω)이다. 공칭 시스템의 상대차수가 1이므로 Q-필터의 분모항을 3차, 분자항을 2차로 설계한다.

$$Q_{img}(s) = \frac{c_2 s^2 + c_1 s + c_0}{(\tau_2 s)^3 + a_2 (\tau_2 s)^2 + a_1 (\tau_2 s) + a_0} \quad (6)$$

식 (6)의 분모 계수는 Q-필터가 안정하게 설계한다 (τ_2 : 시정수). 분자의 계수를 $c_2 = a_2 \tau_2^2$, $c_1 = a_1 \tau_2 + \tau_2^3 \omega_d^2$, $c_0 = a_0$ 로 설계하면, 외란에서 출력 전달함수의 분자에 외란 주파수(ω_d)를 포함한 $s(s^2 + \omega_d^2)$ 항을 갖게 된다. 이를 통해 시스템 출력에서 정현파 외란의 영향이 점근적으로 사라진다.

3.3 속도 PI 관측기 설계

주 제어기와 IM_QDOB에 필요한 속도를 추정하기 위해 불확실성에 강인한 PI 관측기를 설계한다[2]. 이를 위해 아래와 같은 시스템 식을 고려한다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + B(u + \xi) \\ y &= Cx. \end{aligned} \quad (7)$$

단, $x = \begin{bmatrix} \theta \\ \omega \end{bmatrix}$, $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{K_t K_b}{J_n R_n} \end{bmatrix}$, $B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{K_t}{J_n R_n} \end{bmatrix}$, $C = [1 \ 0]$ 이다.

외란 ξ 가 관측기 수렴 속도에 비해 느리다고 가정하고 관측기를 설계하면 식 (8)과 같고, 관측오차 시스템 (9)가 안정하도록 관측기 이득 L_1 과 L_2 를 설계한다. 이 때, 추정된 상태 중 속도 추정치($\hat{\omega}$)만 제어기 설계에 사용된다. 관측기의 입력 u 는 IM_QDOB가 추정한 외란(\hat{d})을 보상하기 전의 PI 제어기 출력을 사용한다.

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}} &= A\hat{x} + Bu + B\hat{\xi} + L_1(y - \hat{y}), \\ \dot{\hat{\xi}} &= L_2(y - \hat{y}), \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_x \\ \dot{e}_\xi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A - L_1 C & B \\ -L_2 C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_x \\ e_\xi \end{bmatrix} \quad (9)$$

4. 모 의 실험

제안하는 제어기(PI+IM_QDOB)의 성능 확인을 위해 FLC 및 PI+QDOB의 모의실험 결과와 비교한다. 시스템 파라미터는 표 1과 같다. 부하 질량 M 의 공칭 값은 2.5[kg], 외란 $\Delta = 0.02 + 0.03\sin(3t)$ 이고, 제어 주기는 0.1ms이다. PI 제어기는

$\omega_s = 100$, 속도 관측기 극점은 -600 (중근), Q-필터 시정수 $\tau_1 = \tau_2 = 5\text{ms}$, $a_2 = a_1 = 3$, $a_0 = 1$, $\omega_d = 10$ 으로 설계하였다.

표 1 대상 시스템 파라미터

Table 1 System Parameters

항목	값	항목	값
R_u	$0.9075[\Omega]$	L_u	$0.191[mH]$
J_t	$2.9273e-4[kg\cdot m^2]$	B_m	$0.0053891[Nm/(rad/s)]$
M, L	$5[kg], 0.15[m]$	$K_t(K_b)$	$0.0252[Nm/A]([V/(rad/s)])$
n	20	ω^*	$10 \rightarrow 12 \rightarrow 8[rad/s]$

그림 2는 FLC 제어식 (10)을 적용한 시스템 출력과 일반적인 PI+QDOB를 적용한 결과를 나타낸다.

$$u = \frac{K_t}{R_u} \left[(B_m - k_1 J_n) \omega + k_1 J_n \omega^* + \left(\frac{MgL}{n} \right) \sin\left(\frac{\theta}{n}\right) \right] \quad (10)$$

FLC의 경우 파라미터 불확실성으로 인해 시스템 출력에 진동이 발생한다. PI+QDOB 적용 결과는 개선된 성능을 보이지만 확대 그림에서 진동이 존재함을 알 수 있다.

그림 3은 제안하는 제어기의 결과이다. PI+IM_QDOB 적용 시 시스템의 출력이 속도 지령을 잘 추종함을 알 수 있고, 확대 그림에서도 강한 성능을 확인할 수 있다. 또한, 외란 주파수 변동에 대한 강인성 실험으로 속도 지령의 $\pm 20\%$ 변동에도 기준 입력을 충실히 추종함을 확인하였다.

그림 4는 QDOB와 IM_QDOB를 사용할 때 등가 외란(d_e)에서 추정 외란까지 전달함수 보드선도를 비교한 것이다. 등가 외란은 외란 관측기의 추정 외란을 보상하는 위치에서 유입되는 외란으로 생각한다.

$$\hat{d}_e(s) = \frac{QP_n^{-1}M_d}{1-Q+QP_n^{-1}M_d} d_e(s) \quad (11)$$

이 때, $M_d(s) = \frac{K_t}{(J_t s + B_m)(L_u s + R_u) + K_t K_b}$ 이다.

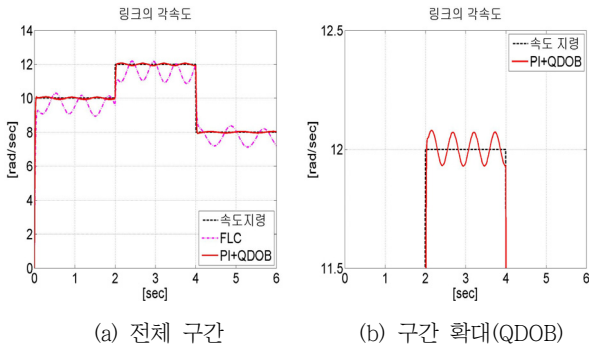


그림 2 FLC와 PI+QDOB 제어기의 적용결과
Fig. 2 Results with FLC and PI+QDOB

일반적인 QDOB 적용 시 입력 외란 주파수($\omega_d = 10$)에서 크기와 위상이 각각 음의 값을 가지므로 크기가 작고 위상이 지연된 추정치로 외란 보상에 한계가 있음을 알 수 있다. 이에 비해 IM_QDOB의 경우 크기와 위상의 왜곡이 거의 없어 정확한 외란 보상이 가능함을 알 수 있다. 또한, QDOB에 비해 대역폭이 넓어 불확실성에 대한 강인성이 개선됨을 알 수 있다.

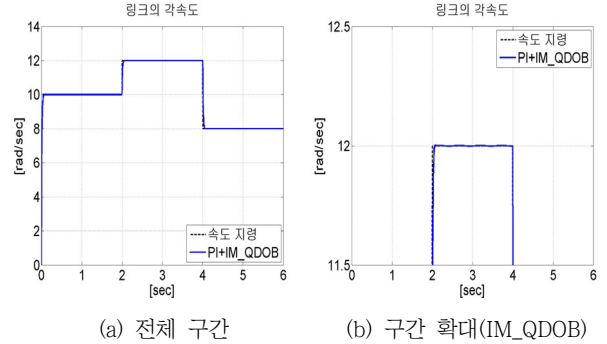


그림 3 PI+IM_QDOB 제어기의 적용결과
Fig. 3 Results with PI+IM_QDOB

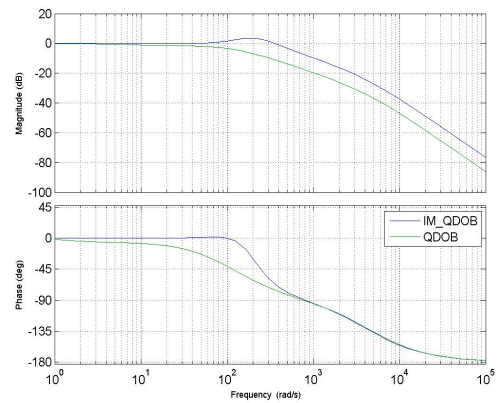


그림 4 등가 외란 전달함수 보드선도
Fig. 4 Bode plot of equivalent disturbance transfer function

5. 결 론

본 논문에서는 지면에 수직으로 회전 운동하는 1축 머니플레이터의 속도 제어 문제를 다루었다. 간단한 제어기 설계를 위해 1차 시스템으로 근사한 공칭 모델에 대한 PI 속도 제어기를 사용하고, 실제 시스템과의 차이와 파라미터 불확실성 및 정현파 외란에 대처하기 위해 IM_QDOB를 설계하여 제어 목표를 달성하였다. 이 때, 속도 정보는 위치 정보로부터 PI 관측기를 사용하여 추정하였다. 비선형항의 소거를 통한 FLC 및 일반적인 QDOB를 적용한 제어기와 비교 모의실험하고 보드선도 해석을 통해 제안하는 방법의 성능을 확인하였다. 향후 실험 연구를 통해 추가적인 불확실성에 대한 강인성 분석이 진행될 계획이다.

감사의 글

이 논문은 2013년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (NRF-2013R1A1A2062370)

References

- [1] J.G. Park, J.Y. Lee, S.H. Kim, S.R Kim, "Optimal Design of Passive Gravity Compensation System for Articulated Robots", *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, vol. 36, pp.103-108, 2012.
- [2] S.E. Talole, J.P. Kolhe and S.B. Phadke, "Extended State Observer Based Control of Flexible Joint System with Experimental Validation", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, pp.1411-1419, 2010.
- [3] N.S. Kang, Nam H. Jo, "A Study on the Controller Design for EMS System Using Disturbance Observer", *Trans. of KIEE*, vol. 62, pp.1264-1269, 2013.
- [4] Y. Choi, K. Yang, W.K. Chung, H.R. Kim, and I.H.S uh, "On the Robustness and Performance of Disturbance Observers for Second-Order Systems", *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 48, pp.315-320, 2003.
- [5] J. Back and H. Shim, "Adding Robustness to Nominal Output Feedback Controllers for Uncertain Nonlinear Systems: A Nonlinear Version of Disturbance Observer", *Automatica*, vol. 44, pp.2528-2537, 2008.
- [6] G.J. Jeong, I.H. Kim, Young I. Son, "Design of a Robust Controller for Position Control of a Small One-Link Robot Arm with Input Time_Delay", *Trans. of KIEE*, vol. 59, pp.1179-1185, 2010.
- [7] G. Park, Y. Joo, H. Shim, "Asymptotic Rejection of Sinusoidal Disturbances with Recovered Nominal Transient Performance for Uncertain Linear Systems", *Proc. of 53rd IEEE Conf. Decision and Control*, Los Angeles, CA, pp.4404-4409, 2014.

저 자 소 개



이 초 원(Cho-Won Lee)

2014년 명지대학교 전기공학과 졸업. 2014년~현재 명지대학교 전기공학과 석사 과정. 관심분야는 모터 제어 및 응용, 강인제어.
E-mail : lanpode26@mju.ac.kr



김 인 혁(In Hyuk Kim)

2009년 명지대학교 전기공학과 졸업. 2011년 명지대학교 전기공학과 졸업 (석사). 2011~2012년 DGIST 연구원. 2013년~현재 명지대학교 전기공학과 박사 과정. 관심분야는 강인 제어 이론, 전기기기 제어, 마이크로프로세서 응용.
E-mail : hyucin@mju.ac.kr



손 영 익(Young Ik Son)

1995년 서울대학교 전기공학과 졸업. 2002년 서울대학교 전기·컴퓨터공학부 졸업(공학박사). 2007~2008년 Cornell University Visiting Scholar. 2003년~현재 명지대학교 전기공학과 교수. 관심분야는 관측기 설계 및 강인 제어 기법, 산업용 모터 제어.
Tel : 031-330-6358
E-mail : sonyi@mju.ac.kr