



외란관측기 설계를 위한 Q필터 시정수 영향 분석

- 외바퀴 로봇의 균형 제어 응용

Analysis of a Time-constant Effect in the Q-filter for Designing a Disturbance Observer : Balancing Control of a Single-wheel Robot

저자 (Authors)	이상덕, 정슬 Sangdeok Lee, Seul Jung
출처 (Source)	전자공학회논문지 53(11) , 2016.11, 123-129 (7 pages) Journal of the Institute of Electronics and Information Engineers 53(11) , 2016.11, 123-129 (7 pages)
발행처 (Publisher)	대한전자공학회 THE INSTITUTE OF ELECTRONICS ENGINEERS OF KOREA
URL	http://www.dbpia.co.kr/Article/NODE07064839
APA Style	이상덕, 정슬 (2016). 외란관측기 설계를 위한 Q필터 시정수 영향 분석. 전자공학회논문지, 53(11), 123-129.
이용정보 (Accessed)	충남대학교 168.***.117.203 2018/05/04 17:27 (KST)

저작권 안내

DBpia에서 제공되는 모든 저작물의 저작권은 원저작자에게 있으며, 누리미디어는 각 저작물의 내용을 보증하거나 책임을 지지 않습니다. 그리고 DBpia에서 제공되는 저작물은 DBpia와 구독계약을 체결한 기관소속 이용자 혹은 해당 저작물의 개별 구매자가 비영리적으로만 이용할 수 있습니다. 그러므로 이에 위반하여 DBpia에서 제공되는 저작물을 복제, 전송 등의 방법으로 무단 이용하는 경우 관련 법령에 따라 민, 형사상의 책임을 질 수 있습니다.

Copyright Information

Copyright of all literary works provided by DBpia belongs to the copyright holder(s) and Nurimedia does not guarantee contents of the literary work or assume responsibility for the same. In addition, the literary works provided by DBpia may only be used by the users affiliated to the institutions which executed a subscription agreement with DBpia or the individual purchasers of the literary work(s) for non-commercial purposes. Therefore, any person who illegally uses the literary works provided by DBpia by means of reproduction or transmission shall assume civil and criminal responsibility according to applicable laws and regulations.

논문 2016-53-11-16

외란관측기 설계를 위한 Q필터 시정수 영향 분석: 외바퀴 로봇의 균형 제어 응용

(Analysis of a Time-constant Effect in the Q-filter for Designing a
Disturbance Observer: Balancing Control of a Single-wheel Robot)

이 상 덕*, 정 슬**

(Sangdeok Lee and Seul Jung[Ⓢ])

요 약

본 논문에서는 외바퀴 로봇의 균형 제어 성능을 향상할 목적으로 외란관측기를 사용한다. 외란관측기의 설계는 역 공칭 모델 설계와 Q필터 설계의 두 과정으로 구성된다. 외바퀴 로봇의 역 공칭 모델을 역 스틱 모델로 부터 유도하고 역 공칭 모델의 안정화를 위한 Q필터를 설계한다. 이 과정에서 Q31의 형태를 갖는 필터를 설계하고 Q필터 시정수의 영향에 관한 실험적인 검증 결과를 제시한다. 시정수는 외란 억제 대역폭을 결정하는 역할을 하지만 외란 억제와 센서 잡음 내성은 상보적인 특성을 갖고 있다. 그러므로 전체 시스템을 고려하여 적절한 시정수가 선택되어야만 한다. 이를 해결하기 위해 3개의 서로 다른 시정수가 외란관측기에 각각 사용되었을 때의 제어 성능을 비교하는 실험을 수행한다. 결과 분석을 바탕으로 한 바퀴 로봇의 균형 제어에 대한 외란관측기 설계에 적합한 시정수 변수의 설계 범위를 제안한다.

Abstract

Disturbance Observer(DOB) based control is considered for the purpose of the balancing performance enhancement in a single-wheel robot. Design of DOB can be folded into two parts, the inverse model of the plant and the Q-filter. The inverse model is derived from the inverted stick model and a Q-filter is designed to stabilize the inverse model. In this paper, a Q31 filter is designed and its effect is evaluated by experimental studies. The time constant provides a complimentary characteristic between the disturbance suppression and the sensor noise immunity. Therefore, suitable selection of the time-constant must be considered. Comparative experiments are conducted to investigate the control performances when three different Q filters are respectively applied in the DOB. Through the analysis of the experimental results, a time constant is designed to have a proper value in the design of DOB for balancing control of a single-wheel robot.

Keywords : Disturbance observer, Q-filter design, single-wheel robot, time-constant

I. 서 론

전형적인 외란관측기(Disturbance Observer) 기반 제어 방법은 이중 피드백 제어 루프의 형태를 갖는다^[1].

* 학생회원, ** 정회원, 충남대학교 메카트로닉스공학과 (Department of Mechatronics Engineering, Chungnam National University)

Ⓢ Corresponding Author (Email : jungsl@cnu.ac.kr)

※ 본 논문은 2014년 한국연구재단 기초연구사업(NRF-2014R1A2A1A11049503)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다.

Received ; June 10, 2016

Revised ; October 25, 2016

Accepted ; October 31, 2016

외부 제어 루프는 설계된 제어 법칙에 따른 입력 추종 성능을 갖고 내부 제어 루프는 플랜트의 모델에 대해 순응하는 특징을 갖게 된다. 그러므로 외란관측기 기반의 제어 구조는 특정 플랜트의 모델을 충분히 반영하면서 입력 추종 제어의 목적을 달성할 수 있다는 장점을 갖게 된다^[2].

내부 및 외부의 불확실한 외란에 대한 강인한 제어 방법이 제안되었고^[3~4] 센서 탑재가 불가능하거나 비용이 많이 드는 시스템에서의 외란 추정 방법이 제안되었다^[5~6]. 마찰력 등과 같은 비선형적인 외란에 대한 추정 방법들이 제안되었고^[7~11] 외란관측기 강인성과 성능

향상에 관한 연구가 제안되었다^[12]. 재귀최소자승법을 이용한 새로운 외란관측기의 구성 방법이 제안되었다^[13]. 신경망 외란관측기와 예측기가 결합된 외란관측기가 제안되었다^[14~15].

외란관측기는 비교적 간단한 설계 과정을 갖고 있으나 실제 시스템에 적용하는 것은 쉽지 않은 특징을 갖고 있다. 먼저 플랜트에 대한 정확한 모델이 요구된다. 이를 공칭 모델(Nominal Model)이라고 한다. 이 때 역공칭 모델의 전달함수를 사용하기 위해 Q필터 설계과정을 거치게 된다. Q필터의 설계 인자는 분모 차수, 분자 차수, 분모와 분자의 상대 차수, 그리고 시정수가 된다.

각 각 1차와 2차의 서로 다른 상대 차수를 갖는 외란관측기의 적용 실험을 통해 상대 차수에 따른 외란관측기의 성능 차이를 제안하였다^[16]. 해당 연구에서는 동일한 시정수 조건에서 상대 차수에 따른 영향을 분석하였다.

본 논문에서는 Q필터의 분모 차수, 분자 차수, 그리고 상대 차수를 고정한 상태에서 시정수에 의한 영향을 제안하고자 한다. Q필터의 시정수 값은 제어시스템의 샘플링 시간과 플랜트의 고유진동주기 사이의 값에서 결정된다. 이 때 플랜트 변수의 변동이 심한 경우나 시스템의 동적 상태에 따른 변수 변화가 예상되는 경우에는 시정수의 상한 값을 선정하기가 어렵게 된다. 그러므로 실제 기준으로 시정수의 하한치에 해당하는 샘플링 시간만을 사용할 수 있게 된다.

외란관측기 기반 시스템의 외란 억제 성능과 센서 잡음 내성은 서로 상보적 관계를 갖고 있으며 Q필터의 대역폭에 의해 그 기준점이 결정된다. 그러므로 시정수 설계 과정은 역 모델 안정성뿐만 아니라 외란관측기 성능에도 직접적인 영향을 주는 요인으로 고려되어야만 한다. 본 논문은 외바퀴 로봇의 균형 제어 성능 향상을 위해 고려된 외란관측기 기반 제어에 있어서 Q필터 시정수의 영향을 분석한 결과를 제안하고자 한다.

II. 외란관측기 설계

1. 외바퀴 로봇 시스템

외바퀴 로봇은 제어모멘트자이로(Control Moment Gyro)의 모션 제어를 이용하여 좌우 밸런싱 제어를 하는 시스템이다. 로봇의 형상은 그림 1과 같다.

제어 모멘트자이로는 고속 회전하는 플라이휠, 플라이휠 회전 모터, 플라이휠의 틸트 각을 제어하는 김벌 모터로 구성되어 있다. 고속 회전하는 플라이휠에 틸트

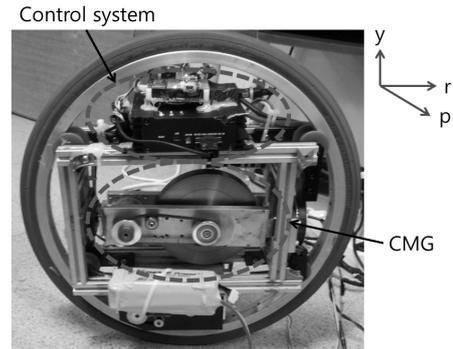


그림 1. 외바퀴로봇 형상
Fig. 1. A single-wheel robot.

모션을 발생시키면 플라이휠의 각운동량 방향과 틸트 모션의 회전축 사이의 외적에 의해 자이로 토크가 생성되는 원리를 이용한다.

$$\tau = H \times \Omega \tag{1}$$

여기서 $\tau(Nm)$ 는 자이로 토크, $H(Nms/rad)$ 는 플라이휠의 회전 각 운동량 $\Omega(rad/s)$ 은 김벌의 틸트 모션을 나타내는 벡터이다. 그러므로 제시된 로봇은 바디의 롤 각과 김벌의 틸트 각이 동시 제어되어야만 한다.

2. 외란관측기 설계: 공칭 모델 유도

외란관측기 설계를 위해서는 먼저 실제 시스템에 대한 공칭 모델의 유도가 필요하다. 시스템의 공칭 모델은 수학적인 유도 방법이나 시스템 인식 방법을 이용할 수가 있다.

본 논문에서는 수학적인 유도 방법을 이용한다. 한바퀴 로봇의 밸런싱 제어의 모델로 역 스틱 모델(Inverted Stick Model)이 고려되었다. 유도된 모델은 다음과 같다.

$$u(t) = J\ddot{\theta}(t) - \frac{1}{2}MgL\theta(t) \tag{2}$$

여기서 J 는 로봇의 관성질량이고 M 은 로봇의 무게이고 g 는 중력가속도이고 L 은 로봇의 지름이고 $\theta(t)$ 는 시간에 따른 롤 각이고 $u(t)$ 는 시간에 따른 입력 토크이다. 그러므로 제시된 로봇시스템은 토크 입력-롤 각도 출력을 하는 입력-출력 시스템으로 정의할 수가 있다.

시스템 모델로부터 전달함수를 구하면 다음과 같다.

$$P_n(s) = \frac{V(s)}{U(s)} = \frac{1}{Js^2 - \frac{1}{2}MgL} \tag{3}$$

여기서 $P_n(s)$ 는 시스템 공칭 모델이고 $U(s)$ 는 시스템입력의 주파수 영역 다항식이고 $V(s)$ 는 시스템출력의 주파수 영역 다항식이다. 로봇의 관성질량은 $3(kgm^2)$ 이고 질량은 $12(kg)$, 지름은 $0.5(m)$ 이다. 제시된 공칭 모델은 3.13과 -3.13 위치에 두 개의 극점을 갖는 불안정한 시스템에 해당한다.

본 논문에서 제어 방법은 비례미분제어기(PD-Controller)를 사용하는데 초기 롤 각의 오차 누적에 의한 발산을 억제하기 위해 I-gain은 사용하지 않는다.

3. 외란관측기 설계: Q필터 설계

전형적인 외란관측기의 구조는 그림 2와 같다. 그림 2에서 r 은 제어 명령이고, u 는 외란 보상이 된 제어 입력이고, d 는 외란이고, \hat{d} 은 추정 외란이고, P 는 플랜트이고, Q 는 필터이고, P_n^{-1} 는 역모델이고, y 는 출력이고, ε 은 센서 노이즈이다.

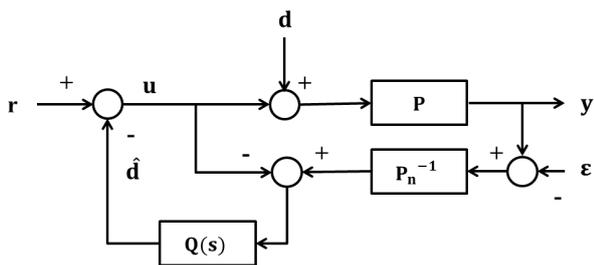


그림 2. 전형적인 외란관측기
Fig. 2. A disturbance observer scheme.

역 공칭 모델은 다음과 같이 쓸 수가 있다.

$$P_n^{-1}(s) = 3s^2 - 29.4 \quad (4)$$

(4)는 시스템의 안정성을 만족하지 못하는 형태이므로 Q필터를 사용하여 이 문제를 해결한다. 그러므로 Q필터는 항상 저역통과필터의 형태를 갖게 되며 안정한 형태가 고려된다.

Q필터의 통과대역 외에 있는 입력 신호들은 필터링을 통해 걸러지는 효과가 생기게 된다. 일반적으로 넓은 대역폭을 갖는 Q필터를 구성할수록 외란억제의 효과가 커지지만, 보다 넓은 대역폭을 설계하기 위해서는 보다 빠른 샘플링 시간이 필요하게 된다.

Q필터의 대역폭 설계의 또 다른 문제점은 센서 잡음 내성과의 상보적인 관계로 인해 발생한다. Q필터의 대역폭이 커질수록 고주파 센서 잡음에 해당하는 ε 의 영향이 증가할 수 있기 때문이다.

$$G_{dy}(s) = (1 - Q(s))P(s) \quad (5)$$

$$G_{eu}(s) = Q(s)P(s)^{-1} \quad (6)$$

그러므로 Q필터 설계는 필터 대역폭 최적화의 문제를 항상 안고 있다. 본 논문에서 제시된 Q필터 설계에 있어서 대역폭에 의해 실제 외박위 로봇이 어떤 영향을 받는지 분석하고 그 결과를 제시하고자 한다.

저역통과필터의 전형적인 특성에 의해 필터의 차수가 클수록 차단주파수 성능은 향상된다. 다시 말해 고차 필터일수록 차단 주파수의 날카로움이 커지게 된다. 하지만 그룹 지연과 같은 문제가 발생하고 필터의 탭수가 증가하여 비용이 상승하는 문제가 함께 발생하게 된다.

본 논문에서는 Q필터의 차수와 형태가 일정하다는 전제하에 시정수에 따른 문제를 분석하고자 한다. 이에 따라 다음과 같이 정해진 Q필터를 사용한다.

$$Q_{31} = \frac{3(\tau s) + 1}{(\tau s)^3 + 3(\tau s)^2 + 3(\tau s) + 1} \quad (7)$$

Q필터의 설계인자는 시정수 τ 가 되므로 Q필터 설계를 위해서 어떤 값의 시정수를 사용해야 하는지를 결정하는 것이 필요하게 된다. 여기서 시정수의 설정에 따라 두 성능의 상보관계의 기준점이 변하게 된다.

시정수는 제어 시스템의 샘플링 시간보다 빠르게 설정할 수가 없기 때문에 샘플링 시간은 설계가능한 시정수의 최소값에 해당한다. 또한 시정수는 시스템의 지연에 해당하기 때문에 플랜트 고유진동주기보다는 항상 작은 값을 사용해야만 한다. 하지만 공칭 모델은 실제 모델과는 다르기 때문에 플랜트의 고유진동주기를 정확히 알기는 매우 어려운 문제가 있다. 그러므로 실제적인 설계 기준은 정확한 설정이 가능한 제어시스템의 샘플링 주기를 이용하는 것이 바람직하다고 볼 수 있다. 본 논문에서 사용하는 샘플링 주기 T_s 는 $5ms$ 이다.

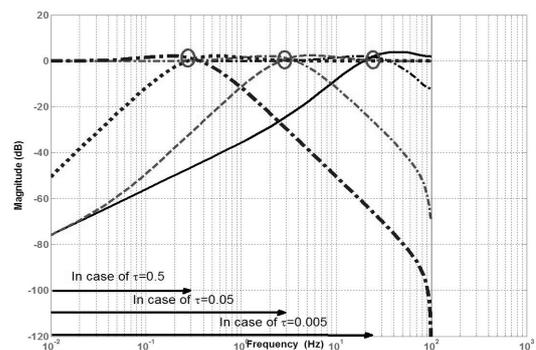


그림 3. Q필터 특성
Fig. 3. Q-filter characteristics.

그림 3은 시정수의 영향 분석을 위해서 시정수가 T_s 와 같을 경우, $10T_s$ 일 경우, 그리고 $100T_s$ 인 경우에 대한 분석을 나타낸다.

외란억제 대역폭은 시정수의 값에 의해 결정된다. 시정수 값이 샘플링 주기와 같을 경우 외란 억제 대역폭은 대략 27Hz 부근으로 나타나고 시정수 값이 샘플링 주기의 10배일 경우에 외란 억제 대역폭은 2.7Hz 부근에서 나타나고 시정수 값이 샘플링 주기의 100배인 경우 외란 억제 대역폭은 약 0.27Hz 부근에서 나타난다. 외란관측기는 외란과 모델 불확실성을 모두 외란으로 취급하는 특징을 갖고 있으므로 만약 시스템에 작용될 외란의 주파수 특성이 수백Hz일 경우에는 해당 Q필터에 의한 외란 검출이 불가능하게 된다. 하지만 시스템에 작용하는 외란의 성격을 알기 어려운 문제가 있으므로 실험을 통한 분석이 필요하다.

III. 실험 결과

1. 실험 환경

외란관측기의 설계 과정에서 시정수 선택을 위한 실험환경은 그림 4와 같다. 그림 4의 로봇에 있는 DSP에는 외란관측기 기반의 PD제어기가 탑재된다.

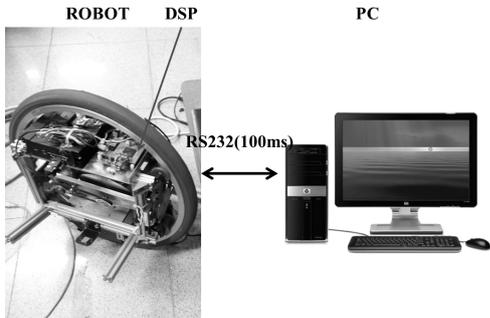


그림 4. 실험 환경
Fig. 4. Experimental setup.

외란관측기 기반 제어 성능은 RS232C 통신을 통해 매 주기 100ms 간격으로 PC를 이용하여 모니터링 하게 된다. DSP에 탑재된 외란관측기 기반의 전체 제어기의 구조는 그림 5와 같다.

PD제어에서 P-게인은 4를 사용하고 D-게인은 0.4를 사용한다. 실험의 정확성을 위해 3개의 시정수에 대해 동일한 게인값들을 사용한다.

(8)은 시정수값이 0.005sec 일 때이고 (9)는 시정수값이 0.05 sec일 때이고 (10)은 시정수값이 0.5sec 일 경우이다.

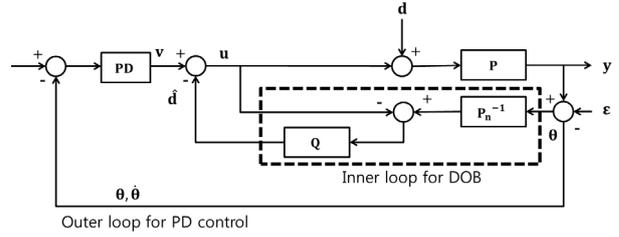


그림 5. 제안하는 제어기의 전체 구조
Fig. 5. Overall scheme for the proposed controller.

$$Q(0.005) = \frac{0.015s + 1}{1.25 \cdot 10^{-7}s^3 + 7.5 \cdot 10^{-5}s^2 + 0.015s + 1} \quad (8)$$

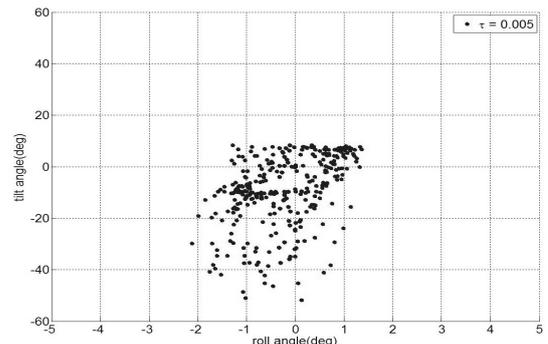
$$Q(0.05) = \frac{0.15s + 1}{1.25 \cdot 10^{-4}s^3 + 7.5 \cdot 10^{-3}s^2 + 0.15s + 1} \quad (9)$$

$$Q(0.5) = \frac{1.5s + 1}{0.125s^3 + 0.75s^2 + 1.5s + 1} \quad (10)$$

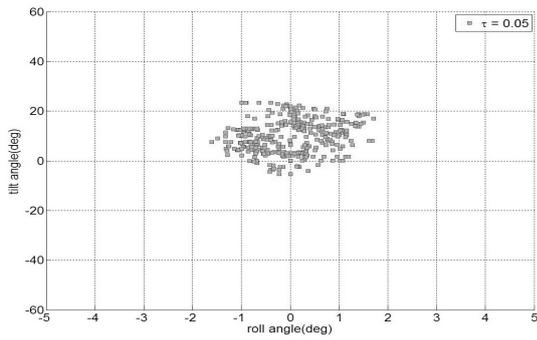
2. 결과분석

제시된 세 개의 외란관측기가 적용되었을 때 외바퀴 로봇의 균형 제어 성능을 실험한 결과는 그림 6과 같다. 그림 6에서 X-축은 롤 각이고 Y-축은 틸트 각이다. 제어 성능은 이 둘의 값이 보다 작은 범위 내에 위치할수록 우수하다고 평가할 수가 있다.

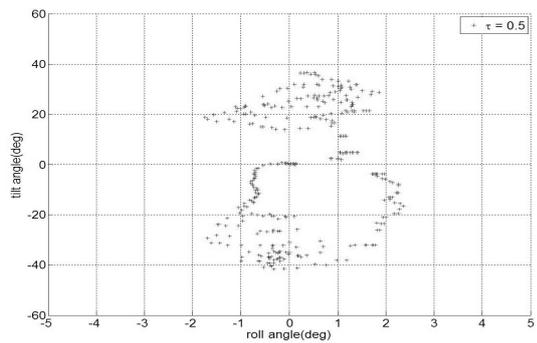
그림 6에서 보면 시정수 값에 따라 그 성능에 차이가 발생함을 볼 수가 있다. 시정수가 0.005sec 인 경우 롤 각은 대략 -2도~1.5도 사이 이고 틸트 각은 대략 -45도~10도 이다. 이와 비교하여 시정수 값이 0.05sec 인 경우를 보면 롤 각은 대략 -1.5도~1.5도 범위이고 틸트 각은 대략 -10도~20도 정도임을 알 수가 있다. 또한 시정수가 0.5sec 인 경우를 보면 롤 각은 대략 -2도~2.5도 이고 틸트 각은 대략 -40도~40도 임을 볼 수가 있다.



(a) $\tau = 0.005$



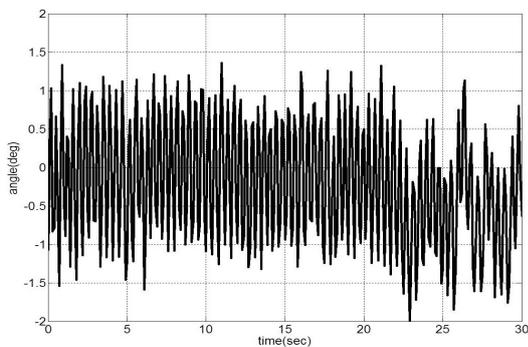
(b) $\tau = 0.05$



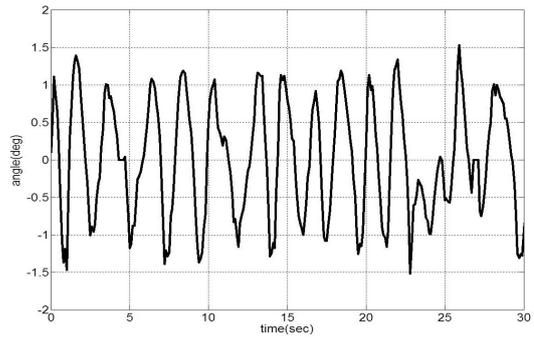
(c) $\tau = 0.5$

그림 6. 실험 결과
Fig. 6. Experimental result.

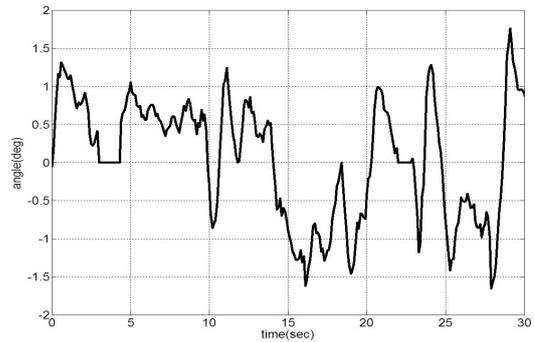
위 실험결과를 통해서 시정수가 0.05sec인 경우가 다른 두 경우보다 좋은 결과를 얻었음을 알 수가 있다. 보다 구체적인 분석을 위해 각각의 경우에 따른 롤 각과 틸트 각의 변화를 알아본다. 그림 7에서 롤 각의 변화는 3개 실험 결과로부터 눈에 띄는 큰 차이를 확인하기가 쉽지 않다. 시정수가 점차 커짐에 따라 로봇의 좌우 롤 각의 변화의 주기가 달라짐을 육안으로 알 수가 있다. 외란관측기에 의해 외란으로 추정된 값이 PD제어기에 반영되는 주기가 점점 커지기 때문이다.



(a) Time-constant 0.005sec



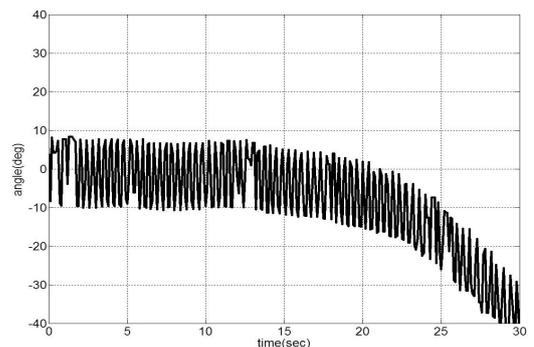
(b) Time-constant 0.05sec



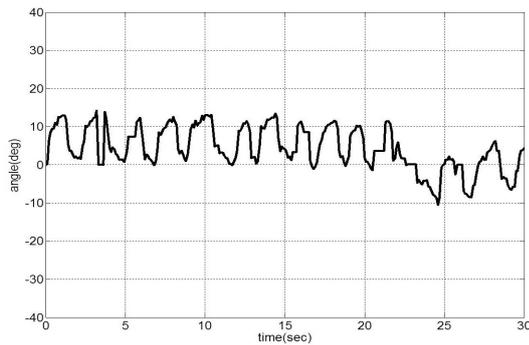
(c) Time-constant 0.5sec

그림 7. 롤 각
Fig. 7. Roll angle.

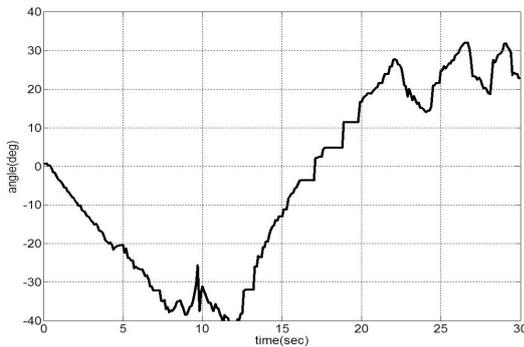
시정수의 영향은 그림 8을 통해 보다 잘 분석될 수가 있다. 시정수가 작은 그림 8 (a)의 경우 채터링 현상이 나타나게 된다. 또한 그림 8 (b)와 (c)에 비해 고주파 성분이 많이 나타남을 볼 수가 있다. 이러한 현상은 시스템이 고주파의 센서 잡음에 대한 내성이 떨어졌다고 해석할 수가 있다. 센서로부터 발생하는 고주파 잡음이 넓은 영역의 대역폭을 갖는 Q필터에서는 감쇄되지 않고 유입될 수 있음을 알 수가 있다. 그 결과 틸트 각이 초기에는 일정각도 안에서 유지되다가 발산하는 현상을 보이게 된다. 그러므로 시스템의 지속성이 떨어지는 문제가 발생하게 된다.



(a) Time-constant 0.005sec



(b) Time-constant 0.05sec



(c) Time-constant 0.5sec

그림 8. 틸트 각
Fig. 8. Tilt angle.

다음으로 그림 8 (c)의 결과를 살펴보면 이 경우 시스템의 응답이 현격히 느려졌음을 확인할 수가 있다. 외란의 대역폭이 그림 8 (a)의 경우에 대비해서 100배 규모로 작아졌기 때문이다. 이때는 그림 8 (a)에서와 같은 고주파에 의한 채터링 현상은 발견되지 않았지만 매우 느린 응답 특성으로 인해 역시 제어 성능이 저하되는 문제가 발생됨을 확인할 수가 있다.

이들과는 다르게 그림 8 (b)의 결과에서는 상대적으로 안정한 성능을 확인할 수가 있다. 적절한 시정수가 선택되어진 결과이다.

또한 앞서 제시한 그림 7의 결과를 통해서 시정수에 따른 상대적인 성능 차이를 구분하기에 쉽지 않은 이유는 시스템의 특성 때문이다. 김벌 모터의 경우 제어 입력이 직결되어 작동하기 때문에 시정수 특성 파악이 비교적 쉽게 될 수 있었던 반면 (1)의 식에서 보는 바와 같이 자이로 토크가 유도되는 과정에서는 시스템에 의한 저역통과필터링의 효과가 발생하기 때문이다. 즉 김벌 시스템에서 바디시스템으로의 자이로 토크의 유도 과정에서 김벌 모터에서 발생하는 고주파 성분들이 감쇄되는 또 다른 효과가 발생하기 때문이다. 그러므로 보다 민첩한 시스템에서는 상대적으로 외란관측기의 시

정수에 따른 효과를 직접적으로 확인할 수가 있으나 제시된 시스템과 같이 고유 질량이 큰 시스템에서는 그 효과 관측이 쉽지 않게 된다.

제시된 실험 분석 결과를 바탕으로 시정수는 외란관측기의 제어 성능에 시스템의 특성과 연관하여 영향을 준다고 볼 수 있다. 외바퀴로봇의 균형 제어 문제에 있어서는 샘플링 시간의 10배 실험에서 다른 두 실험의 경우 보다 향상된 효과가 발생함을 확인할 수가 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 시정수에 의한 외란관측기의 영향을 실험 결과를 통해 확인하였다. 외란관측기 설계 과정에서 Q필터의 설계는 시스템의 공칭 모델에 기반하여 설계되어질 수 있고 외란 억제 대역폭은 Q필터의 시정수를 사용하여 조절할 수 있음을 보였다. 이 때 시정수의 올바른 설계를 위해서 3개의 서로 다른 시정수 값을 각각 적용한 사례 분석을 실시하였고 그 결과 제시된 제어 문제에 대한 적절한 시정수 값의 범위를 제안하였다. 종래 외란관측기의 연구가 Q필터의 상대적인 차수 선정과 외란에 대한 대역폭 확대 및 강건성에 주로 초점이 맞춰져 있었던 점에 비해 본 논문에서는 시정수에 의한 영향을 제안함으로써 향후 외란관측기 기반의 다양한 시스템 설계에 응용이 될 것으로 기대된다.

REFERENCES

- [1] W. H. Chen, J. Yang, L. Guo, and S. Li, "Disturbance-Observer-Based control and related methods-an overview," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol. 63, no. 2, pp. 1083-1095, Feb. 2016.
- [2] B. Du, S. Wu, S. Han, and S. Cui, "Application of linear active disturbance rejection controller for sensorless control of internal permanent-magnet synchronous motor," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol. 63, no. 5, pp. 3019-3027, May 2016.
- [3] D. Xing, J. Su, Y. Liu, and J. Zhong, "Robust approach for humanoid joint control based on a disturbance observer," *IET Control Theory Application*, Vol. 5, no. 14, pp. 1630-1636, Sep. 2011.
- [4] E. Schrijver and J. V. Dijk, "Disturbance observers for rigid mechanical systems: equivalence, stability, and design," *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 124,

- no. 4, pp. 539-548, 2002.
- [5] S. Katsura, Y. Matsumoto, and K. Ohnishi, "Modeling of force sensing and validation of disturbance observer for force control," IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 54, no. 1, pp. 530-538, Feb. 2007.
- [6] Y. Ohba, K. Ohishi, S. Katsura, Y. Yoshizawa, and K. Majima, "Sensorless force control for injection molding machine using reaction torque observer considering torsion phenomenon," IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 56, no. 8, pp. 2955-2960, Aug. 2009.
- [7] W. Kim and C. C. Chung, "Robust output feedback control for unknown non-linear systems with external disturbance," IET Control Theory & Applications, Vol. 10, no. 2, pp. 173-182, 2016.
- [8] J. H. Choi, J. S. Kim, and K. H. Kim, "Robust tracking performance of linear induction motor-based automatic picking system using a high-gain disturbance observer," IET Electric Power Applications, Vol. 10, no. 1, pp. 45-53, 2016.
- [9] H. Pan, W. Sun, H. Gao, and X. Jing, "Disturbance observer-based adaptive tracking control with actuator saturation and its application," IEEE Trans. Automation Science and Engineering, Vol. 13, no. 2, pp. 868-875, May 2016.
- [10] M. Ruderman, "Tracking control of motor drives using feedforward friction observer," IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 61, no. 7, pp. 3727-3735, July 2014.
- [11] M. Ruderman and M. Iwasaki, "Observer of onlinear friction dynamics for motion control," IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 62, no. 9, pp. 5941-5949, Sep. 2015.
- [12] K. Kong and M. Tomizuka, "Nominal model manipulation for enhancement of stability robustness for disturbance observer-based systems", International Journal of Control, Automation, and Systems, Vol. 11, no. 1, pp. 12-20, Jan. 2013.
- [13] S. D. Lee and S. Jung, "Parameter estimation of a single-wheel robot by a recursive least Square method for a disturbance observer", ICROS 2016, pp. 235-236, Mar. 2016.
- [14] E. T. Kim, "Robust tracking control of a flexible joint robot system using a CMAC neural network disturbance observer", Journal of the Institute of Electronics Engineers of Korea SC, Vol. 40, no. 5, pp. 1-9, Sep. 2003.
- [15] K. W. Song, "Robust tracking control of a flexible joint robot system using a CMAC neural network disturbance observer", Journal of the Institute of Electronics Engineers of Korea SC,

Vol. 44, no. 1, pp. 33-39, Jan. 2007.

- [16] S. D. Lee and S. Jung "Experimental study and design of a disturbance observer for steering stabilization of a one-wheeled balancing robot", JICROS, Vol. 22, no. 5, pp. 353-360, May 2016.

저 자 소 개



이 상 덕(학생회원)
1998년 전북대학교 전자공학과 학사 졸업.
1998년~2000년 LG 정밀 근무
2003년 전북대학교 전자공학과 석사 졸업

2003년~2014년 삼성중공업 연구원
현재 충남대학교 메카트로닉스공학과 박사과정.
<주관심분야: 외바퀴 로봇응용>



정 슬(정회원)
1988년 미국 웨인주립대학교 전기 및 컴퓨터공학과 학사 졸업.
1991년 미국 캘리포니아 데이비스 대학교 전기 및 컴퓨터 공학과 석사 졸업.

1996년 미국 캘리포니아 데이비스대학교 전기 및 컴퓨터 공학과 박사 졸업.
1997년~현재 충남대학교 메카트로닉스공학과 교수
<주관심분야: 지능로봇, 유무인수송체, 로봇교육>