

한 바퀴 밸런싱 로봇의 조향 안정화를 위한 외란관측기 설계 및 실험 연구

Experimental Study and Design of a Disturbance Observer for Steering Stabilization of a One-wheeled Balancing Robot

이 상 덕, 정 슬*

(Sang-Deok Lee¹ and Seul Jung^{1,*})

¹Department of Mechatronics Engineering, Chungnam National University

Abstract: In this paper, a DOB (disturbance observer) is designed for the steering stabilization of one-wheeled balancing robot. Based on the simple stick model of the single-wheeled robot, DOBs and the corresponding Q filters are designed. Although the proposed models are simple, DOBs are desired to deal with model uncertainties for the enhanced balancing performance. Experimental studies of two different cases of Q filter design are conducted to evaluate the performances of DOBs. Their performances are compared through balancing control experiments.

Keywords: balancing control, DOB, model uncertainty, one-wheeled robot

I. 서론

제어모멘트자이로(CMG: Control Moment Gyro)와 리액션 휠(RW: Reaction Wheel)은 인공위성의 자세 제어를 위한 대표적인 구동 방식들로 사용되어 왔다[1-5]. 최근에는 소형 인공위성을 위한 소형 CMG의 개발이 제안되고 있다[6]. 제어모멘트자이로는 정속 회전하는 플라이휠의 회전모멘텀의 방향을 제어하는 방식이고 리액션 휠은 플라이휠의 회전 속도 변화를 이용하여 회전모멘텀의 크기를 제어하는 방식이라는 점에서 차이가 있다.

이러한 구동 방식은 최근에는 위성뿐만 아니라 로봇 분야에서도 적용이 되어 지고 있으며 한 바퀴 이동 로봇의 균형 제어는 그 대표적인 예라고 할 수 있다. 한 바퀴 이동 로봇은 제어모멘트를 이용하는 모노사이클 방식[7-8]과 리액션 휠을 이용하는 유니사이클 방식[9,10]으로 구분할 수 있는데 본 논문에서 다루는 로봇은 제어모멘트자이로 방식을 사용하는 모노사이클 방식이다.

제어모멘트 방식을 이용한 한 바퀴 로봇의 균형제어는 자이로 효과에 의한 요잉 모션이 지면의 마찰력과 결합되어 생성되는 툴링 모션을 이용한다는 점에서 툴링 힘을 직접 이용하는 덕트 팬 방식과 다르다[11]. 제어모멘트 방식은 지면과의 마찰력과 중력을 고려해야 하는 문제를 갖고 있다. 제어모멘트의 특성상 내부 플라이휠의 위치에 따라

자이로 힘의 크기와 방향이 변하는 문제를 갖고 있고 지면과 한 점으로 접촉해야 하는 특성 때문에 한 바퀴 로봇이 강인하게 안정한 자세를 유지하는 것은 매우 도전적이다.

모델 관점에서 한 바퀴 로봇은 자이로 효과에 의해 발생하는 힘에 의해 툴링 방향으로 회전 모션을 갖는 강제의 움직임으로 표현할 수 있다[7]. 제어모멘트자이로를 이용한 한 바퀴 로봇의 균형제어 안정성을 분석하기 위해서 역 스틱 모델을 이용한 위상 분석 방법이 제안되었다[8].

실제 균형제어에 있어서 로봇은 요잉의 한쪽 방향으로 회전하려는 특징을 보이는 문제가 발생한다. 이러한 문제점들이 발생하는 이유로는 실제 시스템의 좌우 질량의 비대칭 문제, 지면과의 마찰력, 그리고 고속 회전하는 플라이휠의 불균형성에 의해 생기는 반발력 등과 같이 모델이 쉽지 않은 다양한 동적 특성, 즉 불확실성 때문이다.

이처럼 불확실성과 외란 문제들을 해결하기 위해 다양한 적응 제어 방법과 강인 제어 방법이 제안되어 왔다[12,13]. 외란 관측기를 이용한 방법들이 꾸준히 제안되어 왔는데 측정될 수 없고 알 수 없는 시스템 입력들에 관한 관측기가 제안되었다[14,15]. 로봇과 모션제어에서 발생하는 마찰력 추정을 위한 외란관측기 방법들이 제안되었다[16-19]. 센서리스 힘제어를 위한 외란관측 기반의 제어 방법들이 제안되었다[20-24]. 그러므로 외란관측기는 설계된 모델의 특성을 실제 시스템이 순응할 수 있다는 점에서 앞서 제시된 문제를 다루는데 적합한 방식이라고 할 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 시스템의 특징을 소개하고 시스템의 균형제어를 표현하는 2개의 동적 모델을 제안한다. 다음으로 첫 번째 동적 모델로부터 DOB를 설계하고 두 번째 동적 모델로부터 또 하나의 DOB를 설계한다. 다음으로 설계된 DOB들을 실제 시스템에 탑재한 다음 균형제어 성능을 실험을 통해 검증한다.

* Corresponding Author

Manuscript received January 22, 2016 / revised February 21, 2016 / accepted February 26, 2016

이상덕, 정 슬: 충남대학교 메카트로닉스공학과

(sdcon.lee@cnu.ac.kr/jungsl@cnu.ac.kr)

* 본 논문은 2014년 한국연구재단 이공분야 기초연구사업(NRF-2014R1A2A1A11049503)의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

II. 시스템 특성

1. 한 바퀴 로봇시스템의 구조

한 바퀴 이동 로봇은 시스템 내부에 탑재되어 있는 김벌 시스템의 제어를 통해서 로봇의 좌우 밸런싱을 유지하면서 구르는 동작을 통해 이동을 하는 모노사이클 형태의 로봇이다[25]. 내부에 장착된 제어모멘트자이로(Control Moment Gyro) [26-28]는 자이로 효과에 의해 로봇의 오리엔테이션을 변경하는 역할을 하게 되고 별도로 장착된 구동 모터를 이용하여 로봇의 전진과 후진을 할 수 있는 구조이다. 시스템의 구성은 그림 1과 같다.

제어모멘트자이로에 의해 생성된 자이로 힘은 (1)과 같다.

$$\mathbf{T}_g = \mathbf{H} \times \boldsymbol{\Omega} \tag{1}$$

여기에서 $\mathbf{T}_g(\text{Nm})$ 는 자이로 효과에 의해 발생하는 토크에 해당하고, 벡터 $\mathbf{H}(\text{kgm}^2/\text{s})$ 는 플라이휠의 각운동량이고 벡터 $\boldsymbol{\Omega}(\text{rad/s})$ 는 김벌 모터에 의한 각운동량이다.

자이로 효과의 발생 방향은 플라이휠의 회전중심축과 김벌 모터의 회전 중심축의 외적이 되고 그 크기는 두 벡터 크기의 곱에 해당한다. 플라이휠의 회전속도가 클수록 벡터 \mathbf{H} 는 증가하게 되므로 자이로 토크는 증가하게 되며 김벌의 각속도가 커질수록 역시 자이로 토크가 증가하는 특징을 갖고 있다.

2. 시스템 모델

제어모멘트자이로가 탑재된 로봇의 첫 번째 모델은 (1)로부터 유도된다. 김벌의 모션에 의해 생성된 자이로 힘은 바디의 모션에 영향을 끼친다. 이 때 바디의 모션은 물리적으로 (1)과 유사한 형식을 갖고 있다고 가정할 수가 있다. 에너지의 이동 측면에서 김벌의 모션은 자이로 힘을 생성하고 생성된 자이로 힘은 바디의 모션을 생성시키기 때문이다. 그러므로 바디의 모션은 다음과 같은 모델로 표현할 수 있다[7].

$$u = J\ddot{\theta} + \frac{1}{H}\dot{\theta} \tag{2}$$

여기에서 J 는 로봇의 관성질량이다.

하지만 (2)의 모델에서는 자이로 토크에 의한 바디의 모션만을 고려한 형태이고 플라이휠의 위치가 고려되지 않은 문제를 갖고 있다. 그러므로 플라이휠에 의한 진동을 고려한 보다 확장된 모델은 다음과 같다[8].

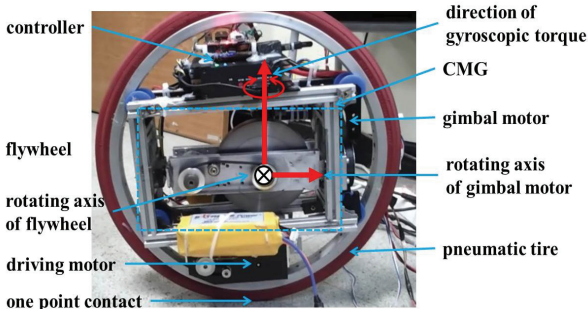


그림 1. 한 바퀴 로봇.
Fig. 1. One-wheel robot system.

$$u = J\ddot{\theta} + (-1 + \beta \text{cost}) Mgr\theta \tag{3}$$

여기에서 βcost 는 수직 방향으로 생성된 진동을 나타내고, M 은 로봇의 무게이고, g 는 중력가속도이고, r 은 로봇의 반지름이다.

제안된 첫 번째 모델은 로봇의 균형제어에 해당하는 롤링 모션만이 고려된 형태이고 두 번째 모델은 롤링 모션과 함께 생성되어지는 피칭 모션이 고려된 형태이다. 하지만, 두 모델에서 요잉 모션에 대해서는 고려가 되어 있지 못한 문제가 발생하게 된다. 실제적으로 로봇의 균형제어를 위한 에너지의 전달 과정을 보면 제어모멘트자이로에 의해 생성된 자이로 힘은 로봇의 요잉 방향으로 먼저 변환되어지고 마찰력에 의해 로봇의 롤링 방향으로 변환되어지게 된다. 이 때 마찰력 보다 큰 힘이 작용했을 경우 로봇에는 롤링 모션과 요잉 모션이 함께 생기게 된다. 또 하나의 문제점은 로봇의 진행 방향을 축으로 해서 좌우 기계 시스템의 질량 분포는 불균형 상태이다. 이 때 특정 방향으로 회전하는 플라이휠에 의해서 생성되는 반작용 힘은 불균형 상태에 있는 로봇으로 하여금 요잉 방향 회전이 발생하게 만들고 그 방향은 플라이휠을 회전시키는 방향에 의해 결정된다.

그러므로 로봇의 균형제어의 성능을 향상시키기 위해서는 제안된 두 개의 모델에 마찰력과 회전 반작용 힘의 영향이 고려되어야만 한다. 그렇지 못할 경우 로봇은 균형제어 동안 조향이 불안정해지는 문제가 쉽게 발생한다.

III. DOB 설계

외란관측기의 전형적인 구조는 그림 2와 같다. 그림 2에서 v 는 제어입력, d 는 외란, P 는 실제로봇, P_n 은 공칭 모델(nominal model), ϵ 은 센서 측정 에러, \hat{d} 은 예측된 외란, $Q(s)$ 는 저역 통과 필터이고, u 는 입력 토크에서 추정외란을 제거한 토크이다.

공칭 역모델의 경우 분자의 차수가 분모보다 큰 형태의 전달함수가 되므로 저역통과필터를 이용하여 고주파의 잡음은 제거되 저주파 영역의 외란은 통과시켜서 추정하는 방법을 사용하게 된다. 그러므로 공칭 역모델을 유도하는 것과 유일한 설계 인자에 해당하는 저역통과필터의 시정수를 정해주는 것으로 외란관측기의 설계가 가능하게 된다. 이 때 설계된 필터를 Q 필터라고 한다.

그림 2는 그림 3과 같은 등가 모델로 표현될 수 있으며 DOB의 설계는 공칭 모델과 Q 필터의 조합으로 이루어질

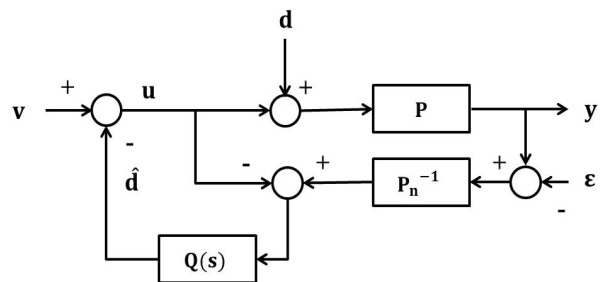


그림 2. 외란관측기 구조.
Fig. 2. Architecture of disturbance observer.

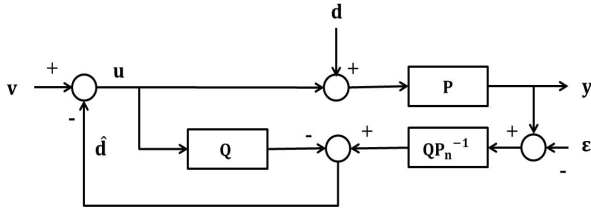


그림 3. DOB 등가 모델.
Fig. 3. Equivalent model of DOB.

수 있다.

1. 상대차수 1인 모델의 Q 필터 설계

(2)에서 제시된 모델에 기반한 1차 DOB를 설계한다. 먼저 (2)로부터 플랜트의 전달함수를 구하면 다음과 같다.

$$U(s) = Js\omega(s) + \frac{1}{H}\omega(s) \tag{4}$$

$$P_n(s) = \frac{\omega(s)}{U(s)} = \frac{1}{Js + \frac{1}{H}} \tag{5}$$

실제 로봇의 관성질량 J는 계산에 의해서 0.3016(kgm²)으로 구해졌고 플라이휠의 회전 속도는 대략 5,350RPM 부근이고 그 때의 각운동량 H를 구하면 3.3154(Nms/rad)가 된다. 식 (5)에 수치를 대입하여 구하면 다음과 같다.

$$P_n(s) = \frac{H}{HJs + 1} = \frac{3.3154}{1.2433s + 1} \tag{6}$$

$$P_n^{-1}(s) = \frac{1.2433s + 1}{3.3154} \tag{7}$$

(7)에서와 같이 공칭 모델의 역모델은 실현이 불가능한 모델이므로 Q 필터를 설계한다. 제안하는 Q 필터는 최소 모델에 해당하는 1차 필터를 사용한다.

(8)에서 τ는 유일한 설계 인자인 시정수를 나타낸다. 시정수의 선택은 기계적인 응답 특성을 고려하여 선정할 수 있으며 본 논문에서는 0.1을 사용한다.

$$Q(s) = \frac{1}{s\tau + 1}, \tau = 0.1 \tag{8}$$

$$QP_n^{-1}(s) = \frac{1}{3.3154} \frac{1.2433s + 1}{0.1s + 1} \tag{9}$$

(8)과 (9)를 실제 디지털 시스템에 적용을 위해 쌍변환법을 이용하여 z-변환하게 되면 각각 (10)과 (11)이 된다.

$$Q(z) = \frac{0.04762 + 0.04762z^{-1}}{1 - 0.9048z^{-1}} \tag{10}$$

$$QP_n^{-1}(z) = \frac{1}{3.3154} \frac{11.89 - 11.79z^{-1}}{1 - 0.9048z^{-1}} \tag{11}$$

다음으로 설계된 필터의 특성을 파악한다. 필터 특성 파악을 위해서 제어 신호 v를 이용하여 시뮬레이션 한 결과가 그림 4, 그림 5와 같다.

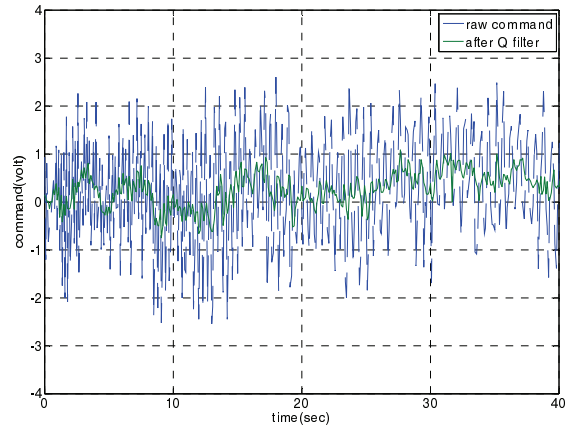
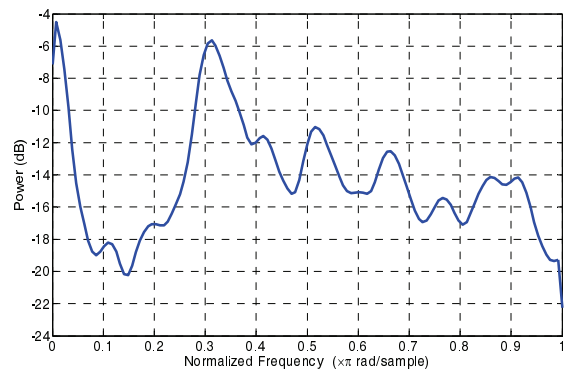
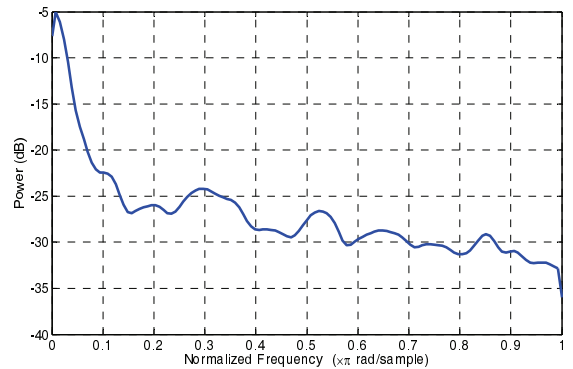


그림 4. 제안된 Q FILTER의 시간 영역 특성.
Fig. 4. Time-domain characteristic of proposed Q filter.



(a) Command set.



(b) Q filtered command set.

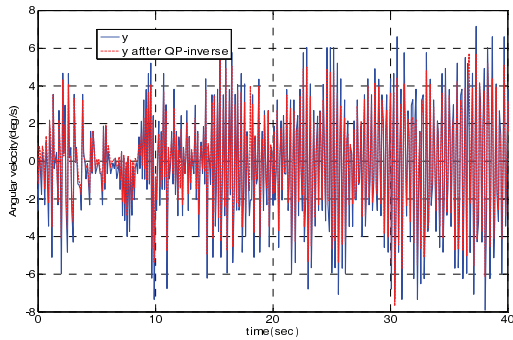
그림 5. Q-FILTER 주파수 특성.

Fig. 5. Frequency-domain characteristic of the Q-filter.

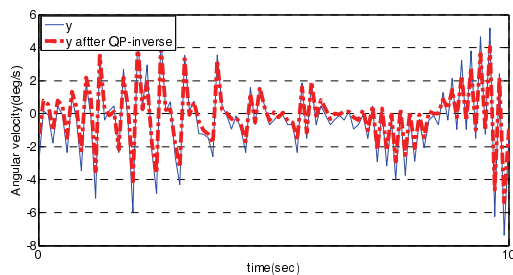
그림 4는 시간 영역에서 제어 입력이 Q 필터를 통과하기 전후의 신호 상태를 보여준다. 제안하고 있는 Q 필터는 (8)과 같이 1차 저역 통과 필터의 형태를 갖고 있으므로 필터링이 된 이후의 신호에서는 고주파 성분이 제거된 형태의 신호를 보이게 된다. 필터를 통과한 이후의 신호의 형태는 그림 5(b)와 같이 고주파 신호가 감쇄된 특성을 보이게 된다. 제어 측면에서는 센서 피드백에 포함된 고주파 잡음의 제거 능력에 해당한다고 볼 수 있다.

다음으로, QP_n^{-1} 의 특성은 그림 6, 7과 같다.

그림 6은 제어 출력으로부터 제어 입력을 추정하는 능력에 해당한다. 공칭 모델의 역을 통과한 제어 출력은 제어 입력을 나타내게 되고 Q 필터가 결합된 공칭 모델의 역은 (9)에서와 같이 고역통과필터의 특성을 보이게 된다. 그림 7을



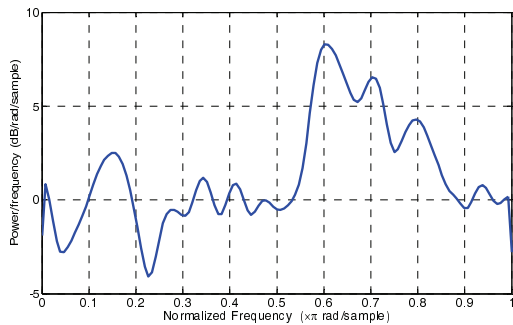
(a) Overall plot.



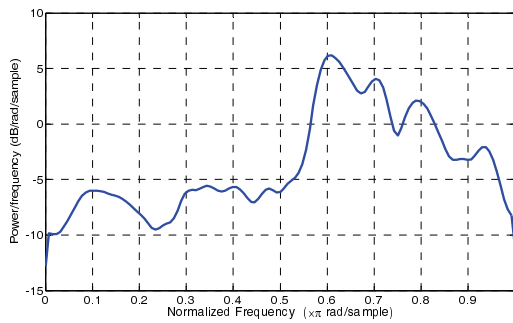
(b) Expanded figure for fine view.

그림 6. 제안된 QP_n^{-1} 의 시간 영역 특성.

Fig. 6. Time-domain characteristic of proposed QP_n^{-1} .



(a) y.



(b) Filtered y.

그림 7. 제안된 QP_n^{-1} 의 주파수 영역 특성.

Fig. 7. Frequency-domain characteristic of proposed QP_n^{-1} .

통해서 저주파 감쇠 효과를 확인할 수가 있게 된다.

2. 상대차수 2인 모델의 Q 필터 설계

다음으로 (3)에서 제시된 모델에 기반한 2차 DOB를 설계한다. 1차 DOB 설계 과정과 동일하게 먼저 전달함수를 구한다. (3)에서 $\beta \ll 1$ 이고 톨링 각이 매우 작다고 가정한다면 (3)의 라플라스 변환은 (12)와 같이 쓸 수 있다.

$$U(s) = Js^2\theta(s) + Mgr\theta(s) \tag{12}$$

$$P_n(s) = \frac{\theta(s)}{U(s)} = \frac{1}{Js^2 + Mgr} \tag{13}$$

$$P_n^{-1}(s) = Js^2 + Mgr \tag{14}$$

모델의 상대차수가 2차인 경우 Q 필터의 경우 (15)에서와 같이 분모의 차수가 3인 필터가 고려될 수 있다[29].

$$Q(s) = \frac{3\tau s + 1}{(\tau s)^3 + 3(\tau s)^2 + 3(\tau s) + 1} \tag{15}$$

앞에서와 마찬가지로 τ 는 0.1을 사용한다.

$$QP_n^{-1}(s) = (0.3016s^2 + 30) \frac{0.3s + 1}{0.001s^3 + 0.03s^2 + 0.3s + 1} \tag{16}$$

(16)을 샘플링 시간 0.01초로 Z-변환하게 되면 (17)과 같다.

$$QP_n^{-1}(z) = \frac{783.1 - 2346z^{-1} + 2343z^{-2} - 780.5z^{-3}}{1 - 2.714z^{-1} + 2.456z^{-2} - 0.7406z^{-3}} \tag{17}$$

설계된 Q 필터의 특성은 그림 8, 9와 같고 QP_n^{-1} 특성은 그림 10, 11과 같다. 그림 8, 9는 그림 4, 5와 같이 설계된 Q 필터의 성능을 보여준다. 설계된 Q 필터는 그림 8과 같은 시간 영역 특성을 보이고 9와 같은 주파수 영역 특성을 보이고 있다. 그림 9에서 보면 그림 5 보다 고주파 영역에 해당하는 신호들의 세기가 더 크게 줄어드는 특징을 확인할 수가 있게 된다. 즉, 그림 9는 그림 5 보다 더 좋은 저역통과 필터 특성을 갖고 있다고 설명할 수가 있다.

하지만 그림 10과 11에서 그림 6, 7과 비교해서 보면, 저주파 외란에 대한 필터 특성이 좋지 못한 결과를 보이고 있다. 이러한 이유는 외란관측기의 상보 특성에서 기인한다고 볼 수 있다. 외란의 억제 능력과 센싱 잡음에 대한 억제 능력은 서로 간에 상보 관계를 갖고 있기 때문이다. 그러므

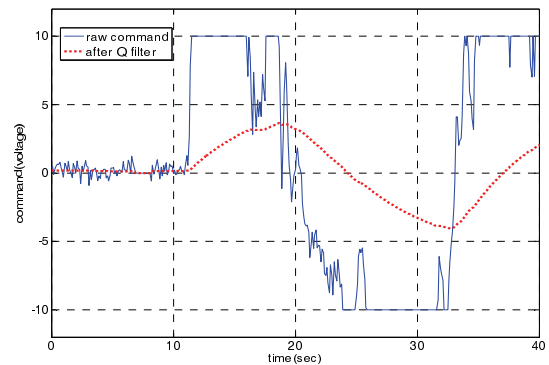
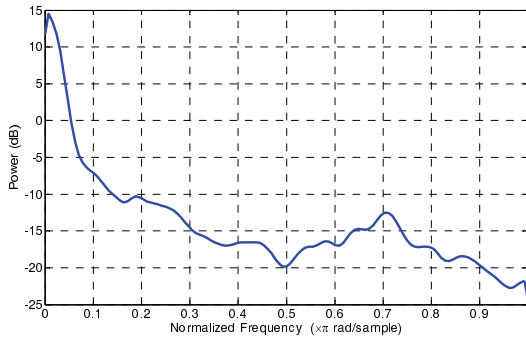
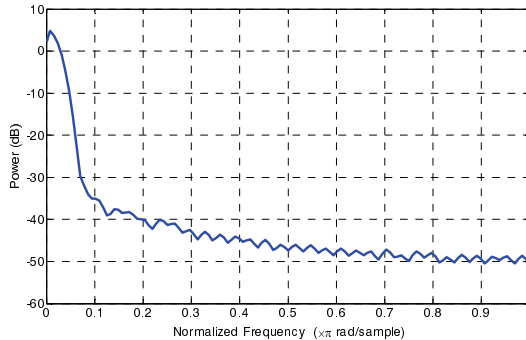


그림 8. 제안된 Q 필터 시간 영역 특성.

Fig. 8. Time-domain characteristic of proposed Q filter.



(a) Command set.



(b) Q filtered command set.

그림 9. 제안된 Q FILTER 주파수 특성.

Fig. 9. Frequency-domain characteristic of proposed Q-filter.

로 제어 대상체에 해당하는 시스템이 외란에 취약한 시스템인지 센싱 잡음에 민감한 시스템인지에 대한 관찰이 설계 과정에서 선행되어야만 한다.

이러한 상보적인 기능을 수식을 통해 요약 설명하면 다음과 같다. 그림 2에서, 외란에 대한 시스템 출력의 전달함수는 (18)과 같이 쓸 수 있다. 식에서 $Q(s)$ 의 대역폭이 클수록 외란에 보다 강한 구조가 될 수가 있는 것이다.

$$G_{dy}(s) = (1 - Q(s))P(s) \quad (18)$$

또한 그림 2에서, 고주파 센서 노이즈와 제어 입력과의 전달함수는 식 (19)와 같이 쓸 수가 있다. $Q(s)$ 의 대역폭을 극대화해서 외란에 강한 구조를 설계하였다고 가정한다면

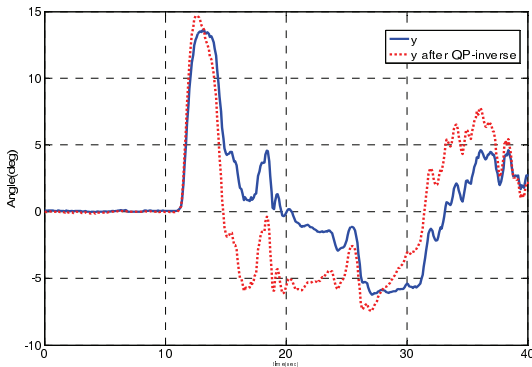
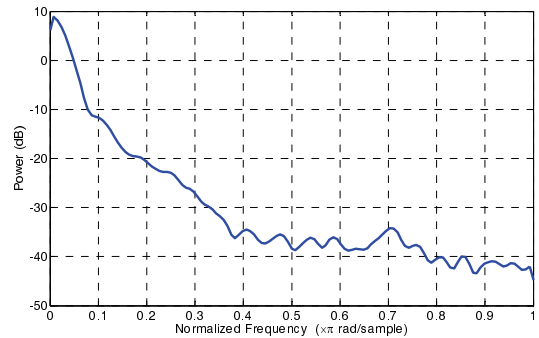
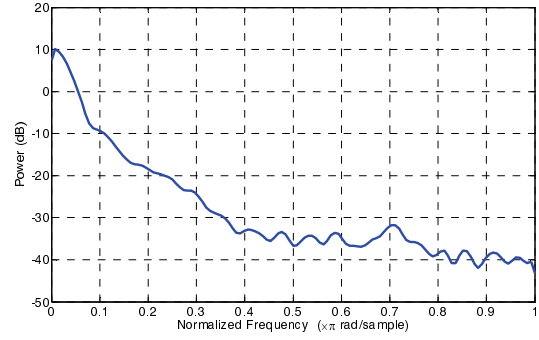


그림 10. 제안된 QP_n^{-1} 의 시간 영역 특성.

Fig. 10. Time-domain characteristic of proposed QP_n^{-1} .



(a) y.



(b) Filtered y.

그림 11. 제안된 QP_n^{-1} 의 주파수 영역 특성.

Fig. 11. Frequency-domain characteristic of proposed QP_n^{-1} .

(19)에서와 같이 센서 노이즈에는 취약한 특성이 나타나게 된다. 그러므로 외란관측기 기반 제어에서 외란과 센서 잡음은 서로 상보적인 관계를 갖고 있다고 볼 수가 있다.

$$G_{eu}(s) = Q(s)P(s)^{-1} \quad (19)$$

IV. DOB의 실험 검증

실험을 위한 환경은 그림 12와 같다. 한 바퀴 로봇은 TMS320F28335 DSP를 제어 프로그램용 소자로 사용하고 있고 플라이휠의 회전 모터와 김벌 모터는 시리얼 통신 기반의 2축 드라이버를 통해서 제어가 된다. 또한 로봇의 자세는 AHRS 센서를 통해서 DSP에 피드백 된다. DSP의 제

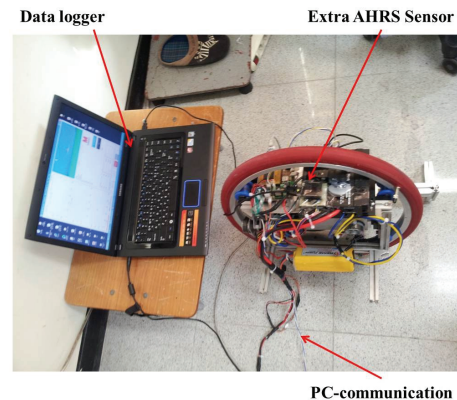


그림 12. 실험 환경.

Fig. 12. Experimental setup.

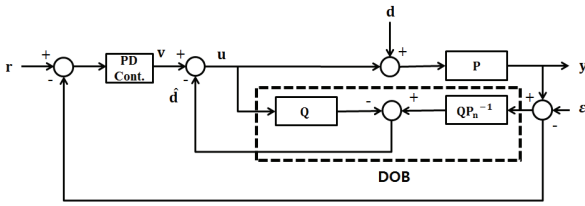


그림 13. 외란관측기 기반 제어기.

Fig. 13. DOB Based Controller.

어 주기는 10ms를 사용한다. 또한 플로팅 연산의 속도를 높이기 위해서 DSP에 탑재되어 있는 FPU (Floating Point Unit) 기능을 사용한다.

외란관측기의 장착 여부에 따른 조향의 변화를 관측하기 위해서 추가적인 센서를 장착하였고 로봇 내부 상태는 DSP에서 RS232C 통신을 통해 PC에서 수집한다. 검증의 방법으로 외란관측기 장착 유무에 따른 조향의 변화를 비교한다.

본 논문에서는 DOB 기반의 PD 제어 방법을 제안한다. 제안하는 제어기의 구조는 그림 13과 같다. 그 성능을 검증하는 방법으로 먼저 DOB가 없는 PD 제어의 성능을 비교한 다음 1차 공칭 모델과 2차 공칭 모델에 따른 DOB 기반의 제어 성능을 비교 검증한다.

1. PD 제어기 성능 검증 결과

먼저 그림 13에서 DOB를 고려하지 않고 비례미분제어기만을 DSP에 탑재한 다음 그 특성을 검증한다. DOB기반의 제어기 설계과정에서는 모델의 특성을 반영한 설계가

수반되어야 하므로 PD 제어기는 제어기의 제어 목표는 모델의 롤 각을 최소화하는 것이다.

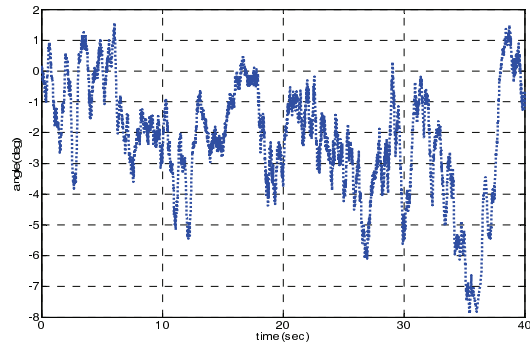
실험 결과는 그림 14와 같다. 그림 14(a)에서 균형제어의 성능을 나타내는 롤링 신호는 일정한 범위 내에서 유지하고 있음을 보여준다. 하지만 그림 14(b)의 조향에 해당하는 요잉 방향의 모션에서는 약 100도 정도의 변화가 발생함을 보여준다. 위와 같은 현상이 발생하는 원인은 모델의 불확실성으로 인한 것이다. 따라서 이 문제를 해결하기 위해 외란관측기를 사용한다. 외란관측기는 앞서 언급했던 것처럼 외부로부터 유입되는 외란이나 내부 모델의 불일치로 인한 문제점이나 모두 외란으로 취급하는 특징을 갖고 있고 Q 필터의 특징에 따라 플랜트의 모델을 추종하는 성격을 갖고 있다.

2. 상대차수가 1인 공칭 모델에 대한 DOB 적용 결과

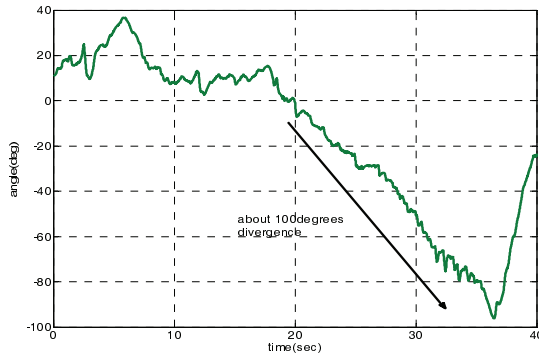
다음으로 첫 번째 제시했던 상대차수가 1인 플랜트 모델이 적용되었을 때의 실험 결과를 바탕으로 제시한 외란관측기의 효과를 검증한다. 제안하는 제어기가 탑재된 실험 결과는 그림 15과 같다. 그림에서 X축은 시간이고 Y축은 요잉각에 해당한다. 그림 15(b)에서 보면 약 100초 동안 대략 ±30도 범위에서 요잉각이 안정화됨을 확인할 수 있다.

3. 상대차수가 2인 공칭 모델에 대한 DOB 적용 결과

다음으로 상대차수가 2인 공칭 모델에 대한 DOB 적용 결과를 실험한다. 실험 결과는 그림 16과 같다. 실험 결과 그림 16(b)의 요잉각의 변화는 100초 동안 대략 ±10도 범위에서 안정화됨을 확인할 수 있었다. 그림 15(b)보다 오차가 작은 것을 볼 수 있다.



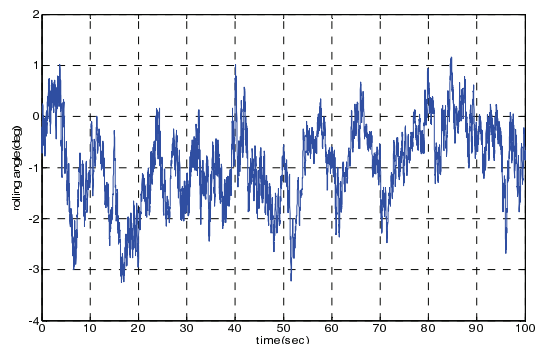
(a) Rolling PD.



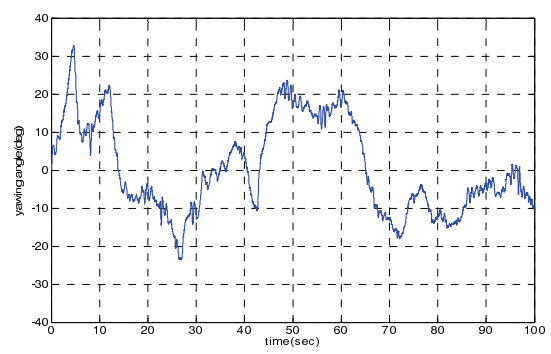
(b) Yawing PD.

그림 14. PD 실험 결과.

Fig. 14. Experimental result of PD only control.



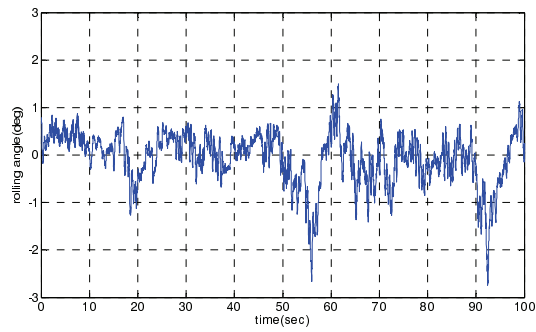
(a) Rolling DOB.



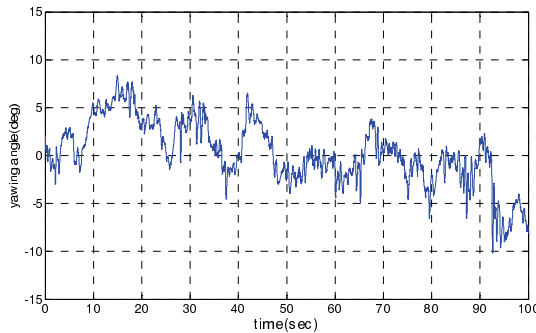
(B) Yawing DOB.

그림 15. 상대차수 1인 실험 결과.

Fig. 15. Experimental result when the relative degree is one.



(a) Rolling DOB.



(B) Yawing DOB.

그림 16. 상대차수 2인 실험 결과.

Fig. 16. Experimental result when the relative degree is two.

V. 결론

본 논문에서는 한 바퀴 로봇의 균형제어를 하기 위한 조향의 안정성을 향상시키기 위해 외란관측기 기반의 제어 방법을 제안하였다. 논문에서 제시한 로봇은 조향에 대한 직접적인 구동기가 없는 상태이기 때문에 조향의 모션을 안정화시킬 수 있는 방법으로 외란관측기를 이용한 모델의 불확정성 보상 방법을 제안하였다. 먼저 상대차수가 1차인 모델에서 Q 필터를 설계하고 필터의 특성과 필터에 의한 공칭 모델의 특성을 확인하였다. 다음으로 상대차수가 2차인 모델을 사용했을 때의 Q 필터와 공칭 모델의 특성을 확인하였다. 설계된 외란관측기는 DSP에 탑재되었고 실험을 통해서 성능을 검증하였다. 외란관측기를 사용하지 않았을 때와 설계된 두 개의 관측기가 각각 탑재되었을 때 시스템의 성능을 각 각 로봇의 균형제어 성능과 요잉 제어 성능을 비교하여 제시하였다. 실험 결과 외란관측기를 탑재함으로써 요잉 모션이 한쪽 방향으로 회전하는 문제점이 개선될 수 있음을 확인할 수 있었고 공칭 모델과 Q 필터가 보다 상세하게 설계될수록 그 성능이 향상될 수 있음을 확인할 수 있었다. 또한 실험에서 선정된 시정수 값에서 볼 때 2차 시스템 모델 기반 Q필터는 고주파 잡음에 상대적으로 탁월하게 강한 면을 보였음을 알 수가 있고 1차 시스템 모델 기반 Q필터의 경우 저주파 외란 억제 능력이 다소 우수하다고 정리할 수가 있다.

REFERENCES

- [1] F. A. Frederick, "Scaled control moment gyroscope dynamics effects on performance," *Acta Astronautica*, vol. 110, pp. 77-88, 2015.
- [2] B. Han, S. Zheng, and Z. Wang, "Design, modeling, fabrication, and test of a large-scale single-gimbal magnetically suspended control moment gyro," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 12, pp. 7424-7435, 2015.
- [3] V. J. Lappas, W. H. Steyn, and C. I. Underwood, "Attitude control for small satellites using control moment gyros," *Acta Astronautica*, vol. 51, no. 1, pp. 101-111, 2002.
- [4] Z. Ismail and R. Varatharajoo, "A study of reaction wheel configurations for a 3-axis satellite attitude control," *Advances in Space Research*, vol. 45, no. 6, pp. 750-759, 2010.
- [5] B. Xiao, M. Huo, X. Yang, and Y. Zhang, "Fault-tolerant attitude stabilization for satellites without rate sensor," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 11, pp. 7191-7202, 2015.
- [6] E. Mumm, K. Davis, M. Mahin, and D. Neal, "Miniature control moment gyroscope development," *IEEE Aerospace Conference*, pp. 1-9, 2014.
- [7] S. D. Lee and S. Jung, "Analysis of relationship between body and gimbal motion through experiment of a single-wheel robot based on an inverse gyroscopic effect," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 21, no. 11, pp. 1064-1069, 2015.
- [8] S. D. Lee and S. Jung, "Experimental verification of stability region of balancing a single-wheel robot: an inverted stick model approach," *Proc. of IECON 2015 - 41th Annual Conference of the IEEE*, Yokohama, Japan, pp. 4556-4561, 2015.
- [9] H. Jin, J. Hwang, and J. Lee, "A balancing control strategy for a one wheel pendulum robot based on dynamic model decomposition: Simulations and experiments," *IEEE/ASME Trans. on Mechatronics*, vol. 16, no. 4, pp. 763-768, 2011.
- [10] J. Lee, S. Han, and J. Lee, "Decoupled dynamic control for pitch and roll axes of the unicycle robot," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 9, pp. 3814-3822, 2013.
- [11] J. H. Lee and H. J. Shin, and S. Jung, "Balancing control of a unicycle robot using ducted fans," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 20, no. 9, pp. 895-899, 2014.
- [12] K. J. Astrom and B. Wittenmark, *Adaptive Control*, Courier Corporation, 2013.
- [13] A. E. Bryson, *Applied Optimal Control: Optimization, Estimation and Control*, CRC Press., 1975.
- [14] G. Hostetter and J. Meditch, "On the generalization of observers to systems with unmeasurable, unknown in-

- puts," *Automatica*, vol. 9, no. 6, pp. 721-724, 1973.
- [15] 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.
- [16] 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, 2011.
- [17] X. Chen, S. Komada, and T. Fukuda, "Design of a nonlinear disturbance observer," *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol. 47, no. 2, pp. 429-437, 2000.
- [18] M. Ruderman, "Tracking control of motor drives using feedforward friction observer," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, no. 7, pp. 3727-3735, 2014.
- [19] M. Ruderman and M. Iwasaki, "Observer of nonlinear friction dynamics for motion control," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 9, pp. 5941-5949, 2015.
- [20] S. Jung, "An impedance force control approach to a quad-rotor system based on an acceleration-based disturbance observer," *Journal of Intelligent Robot System*, vol. 73, no. 1, pp. 175-185, 2014.
- [21] T. Murakami, F. Yu, and K. Ohnishi, "Torque sensorless control in multidegree-of-freedom manipulator," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 40, no. 2, pp. 259-265, 1993.
- [22] E. Sariyildiz and K. Ohnishi, "On the explicit robust force control via disturbance observer," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 3, pp. 1581-1589, 2015.
- [23] 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, 2007.
- [24] 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, 2009.
- [25] S. B. Cardini, "A history of the monocycle-stability and control from inside the wheel," *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 26, no. 5, pp. 22-26, 2006.
- [26] L. Morine, T. O'Connor, J. Carnazza, H. Varner, and D. Pool, "Control moment gyroscope gimbal actuator study," *The Bendix Corporation EclUpse-Pioneer Divisirn Teterboro, New Jersey*, 1966.
- [27] E. Mumm, K. Davis, M. Mahin, and D. Neal, "Miniature control moment gyroscope development," *IEEE Aerospace Conference*, pp. 1-9, 2014.
- [28] S. P. Bhat and P. K. Tiwari, "Controllability of spacecraft attitude using control moment gyroscopes," *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. 54, no. 3, pp. 585-590, 2009.
- [29] C. J. Kempf and S. Kobayashi, "Disturbance observer and feedforward design for a high-speed direct-drive positioning table," *IEEE Trans. on Control System Technology*, vol. 7, no. 5, pp. 513-526, 1999.



이 상 덕

1998년 전북대학교 전자공학과 졸업. 1998년~2000년 LG정밀 근무. 2003년 전북대학교 전자공학과 석사. 2003년~2014년 삼성중공업 연구원. 현재 충남대학교 메카트로닉스공학과 박사 과정.



정 슬

1988년 미국 웨인 주립대 전기 및 컴퓨터공학과 졸업. 1991년 미국 캘리포니아대 데이비스 전기 및 컴퓨터공학과 석사. 동 대학 박사. 1997년~현재 충남대학교 메카트로닉스공학과 교수. 관심분야는 지능 제어 시스템 및 지능 로봇 시스템, 다양한 밸런싱 메커니즘의 제어 및 응용, 유무인 수송체 시스템, 로봇교육.