

필터 설계를 통한 한 바퀴 구동 로봇의 진동 제어

Vibration Control of a Single-wheel Robot Using a Filter Design

이 상 덕, 정 슬*

(Sang-Deok Lee¹ and Seul Jung^{1,*})

¹Department of Mechatronics Engineering, Chungnam National University

Abstract: In this paper, the vibration of a single-wheel mobile robot is minimized by designing a filter. An AHRS (Attitude and heading reference system) sensor is used for measuring the state of the robot. The measured signals are analyzed using the FFT method to investigate the fundamental vibrational frequency with respect to the flywheel's speed of the gimbal system. The IIR notch filter is then designed to suppress the vibration at the identified frequency. After simulating the performance of the designated filter using the measured sensor data through extensive experiments, the filter is actually implemented in a single-wheel mobile robot, GYROBO. Finally, the performance of the designed filter is confirmed by performing the balancing control task of the GYROBO system.

Keywords: Vibration detection, notch filter, AHRS, GYROBO, balancing control

I. 서론

진동 탐색과 저감 분야는 기계시스템 분야와 함께 모션 제어 분야에서도 오랫동안 연구되어왔다. 산업용 서보제어 기에는 회전체의 진동을 저감하기 위한 노치 필터가 내장되어 있기도 하다. 진동 탐색 연구로 [1]은 서보제어기에서의 진동주파수 트래킹에 관한 내용을 소개하고 있다. 또한 PMSM 모터 제어의 진동 주파수 탐색을 위한 FFT 방법과 노치 필터 설계에 관한 내용을 소개하고 있다[2].

이와 같은 연구들은 진동 탐색의 수단으로 속도 피드백 신호를 사용한다는 공통점을 갖고 있고, FFT를 이용하여 진동 주파수를 탐색한다는 공통점을 갖고 있다[3-6]. 회전체가 결합되어 있는 모터의 속도 정보에는 회전 속도에 비례하는 기본 진동 주파수 성분과 그 하모닉 성분들이 들어 있기 때문이다.

진동 저감을 위해서는, 인풋셰이핑을 활용한 연구, 기계적 진동에 대한 서보 제어 기술, 그리고 노치 필터 기술들이 연구되어 왔다[7-10].

산업용 모션 제어기와는 다르게, 경계형 모션 제어기는 진동 탐색과 저감에 대한 기능이 산업용에 비해 충분히 반영 되어 있지 않는 경우가 많다. 또한, 속도제어 시스템 구성에 있어서 개방형 구조로 적용되는 경우가 많기 때문에 진동 탐색을 위한 속도 피드백에 어려움이 있다.

본 논문에서는 진동 탐색과 저감에 대한 기능을 갖추지

못한 한 바퀴 구동 이동로봇인 자이로보(GYROBO) 시스템에서 자세 제어 피드백을 위해 장착되어 있는 AHRS 센서를 활용하여 일정 대역폭 내에서 로봇에 내장된 고속 회전체의 진동을 탐색하는 방법을 제안하고자 한다. AHRS 센서는 주로 오리엔테이션을 추정하기 위한 센서로 활용되어 있는데 본 논문에서는 별도의 진동 센서 없이 AHRS 센서를 활용하여 오리엔테이션 계측과 동시에 진동 탐색 기능의 실현가능성을 제안하고 있다.

한 바퀴 로봇의 구동으로는 바람을 이용하는 방법도 있으나[11] 자이로보는 고속으로 회전하는 플라이휠을 내장한 감별 시스템에 의해 생성되는 자이로 효과에 의해 균형을 유지하는 한 바퀴 구동 이동로봇이다[12-14]. 고속으로 회전하는 회전체 시스템을 탑재하므로 그에 따른 진동이 발생한다. 이러한 진동의 원인은 플라이휠과 구동 시스템의 불규칙한 구조 등 다양하며 이는 균형제어를 어렵게 하고 성능을 떨어뜨린다.

따라서 본 논문에서는 로봇이 균형을 유지하는 상태에서 로봇에 장착된 센서를 이용하여 데이터를 수집하고 진동에 대해 분석한다. 또한 FFT 분석을 통해서 플라이휠의 속도에 따라 기본 진동주파수가 바뀌는 특성을 소개한다. 신호의 분석을 통해 해당 진동 성분을 저감하기 위한 IIR 노치 필터를 설계한다. 끝으로 설계된 노치 필터를 자이로보 제어기에 탑재한 다음, 균형 제어 성능 비교를 통해 제안한 방법의 유효함을 검증한다.

II. 자이로보 시스템

그림 1은 외바퀴 로봇인 자이로보이다. 자이로보는 속도 제어기를 활용하여 고속의 회전체인 플라이휠의 속도를 제어하는 기능을 갖고 있다. 이 때에 고속 회전체에 의해 발생하게 되는 진동 성분은 로봇의 제어성능에 영향을 끼치게 된다.

로봇의 균형제어를 위해 사용된 AHRS 센서는 3-자이로,

* Corresponding Author

Manuscript received June 8, 2015 / revised July 25, 2015 / accepted July 27, 2015

이상덕, 정슬: 충남대학교 메카트로닉스공학과

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

※ 본 논문은 2014년 한국연구재단 기초연구(NRF-2014R1A2A1A11049503)의 지원을 받아 수행되었음.

※ 본 연구는 2015년 제30회 ICROS 학술대회에 초안이 발표되었음[15].

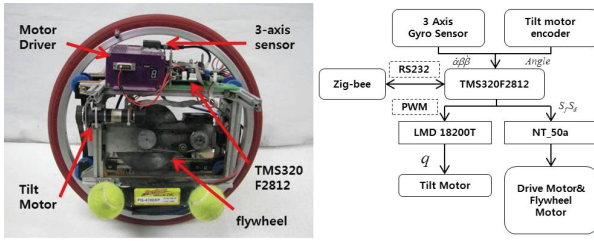


그림 1. 자이로보.
Fig. 1. GYROBO.

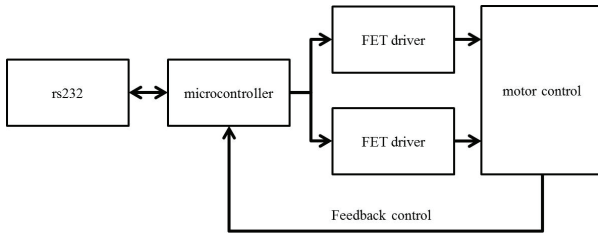


그림 2. 사용된 속도제어기 블록도.
Fig. 2. Block diagram of the velocity controller.

3-가속도, 3-마그넷 센서들을 포함하고 있는 MEMS형태의 센서이다. 낮은 대역폭과 그룹 지연, 그리고 드리프트 문제와 같은 센서들의 전형적인 문제점들을 보완할 수 있는 센서융합 알고리즘이 내장되어 있다.

플라이휠의 고속 회전을 위해서는 NT50A 속도제어기를 사용하고 있고 블록도는 그림 2와 같다.

사용된 속도제어기는 산업용 서보제어기에서 제공하고 있는 노치 필터 기능이 내장되어 있지 않다. 또한 로봇의 플라이휠 모터에는 별도의 피드백을 위한 센서시스템이 부착되어 있지 않고 open-loop 상태에서 사용되고 있다. 따라서 산업용 서보제어기에서 제공하고 있는 진동 저감 노치 필터 기능을 본 시스템에 추가하기 위해서는 진동을 탐색하기 위한 속도 정보의 피드백과 프로세싱 로직을 탑재하거나 별도의 진동센서의 부착 및 처리가 요구된다.

본 논문에서는 진동 탐색의 수단으로서 속도 정보 피드백 기능이나 별도의 진동센서 장착 없이 로봇의 오리엔테이션 추정을 위해 사용하고 있는 AHRS 센서를 이용하여 제한된 범위에서 진동 탐색의 실현가능성이 있음을 제안하고자 한다.

III. 진동 탐색 및 필터설계

1. 실험환경

AHRS 센서를 이용한 진동 탐색은 센서의 샘플링 간격이 그 탐색 범위에 영향을 준다. 사용된 센서의 샘플링 간격은 100 Hz 이고, 초당 100 개의 데이터를 얻을 수가 있다. 나이퀴스트 샘플링 이론을 적용하면 최대 50Hz의 주파수 성분에 대한 분석이 가능하게 된다.

회전체의 불균형으로 인한 진동의 문제는 하모닉 진동 특성을 보인다. 그러므로 AHRS 센서가 탐색 가능한 회전체의 최대 속도는 다음과 같다.

$$50\text{Hz} = 50\text{RPS} = 60 \times 50\text{RPM} = 3,000\text{RPM} \quad (1)$$

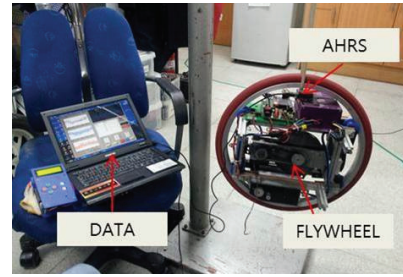


그림 3. 진동탐색 실험환경.
Fig. 3. Vibration detection experimental setup.

표 1. 모터 전압과 회전체 속도 추정 관계.

Table 1. The estimated relation between motor voltage and flywheel speed.

Motor Voltage (V)	Rotational speed (RPM)
0	0
2.25	1,425
4.5	2,850
9	5,700

3,000 RPM으로 회전하는 회전체는 대략 50 Hz의 기본 진동주파수를 갖게 된다. 이러한 간단한 원리를 이용해서 회전체의 진동주파수를 탐색할 수 있게 된다.

먼저 자이로보의 진동을 탐색하기 위해서 다음과 같은 실험적인 방법을 사용한다.

자이로보에 내장된 회전체는 0.075m의 반경을 갖고 있는 무게 2.1Kg의 제어모멘트 자이로용 플라이휠이다. 플라이휠을 구동하는 모터는 부하가 없는 상태에서 최대 12,000 RPM의 회전이 가능하다. 본 시스템은 회전체의 속도를 직접 측정할 수 있는 센서시스템이 장착되어 있지 않고 오픈 제어로 플라이휠의 속도를 제어한다.

이를 해결하기 위해 모터의 전압과 회전체의 속도를 추정하는 방법으로 모터 전압과 회전체 속도 관계를 실험을 통해 확인하였다. 그 결과는 표 1과 같이 요약된다.

2. 데이터 수집 및 진동 탐색

실험을 통해 그림 4와 같이 다양한 회전체 속도에 대한 센서 데이터를 취득한다.

수집된 데이터는 FFT (Fast Fourier Transform) 변환을 통해서 주파수 특성을 분석한다. 롤 방향, 피치 방향, 그리고 요 방향에 대해서 수집된 데이터에 대한 fft 변환을 했을 때 그림 5와 같은 결과를 얻을 수가 있다. 진동 문제는 요 방향에서 두드러지고 회전체의 속도가 증가함에 따라 정규화된 주파수의 파워가 증가함을 확인할 수가 있다.

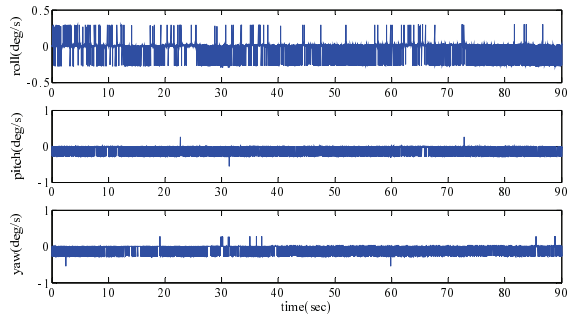
3. 노치 필터 설계

진동 탐색 결과에 따라서 42.5 Hz 대역의 진동을 저감하기 위한 노치 필터를 설계한다. DSP의 성능을 고려하여 차수가 낮은 IIR 형태의 필터를 디자인한다.

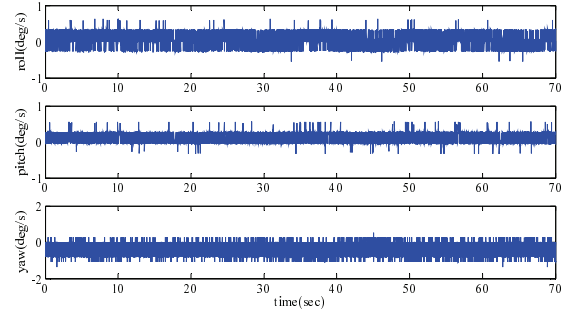
노치 필터의 설계 규격은 표 2와 같다.

아날로그 노치 필터의 전달함수 원형은 다음과 같다.

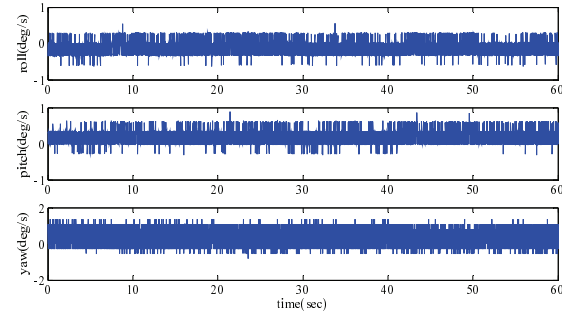
$$H(s) = \frac{s^2 + \omega_c^2}{s^2 + bs + \omega_c^2} \quad (2)$$



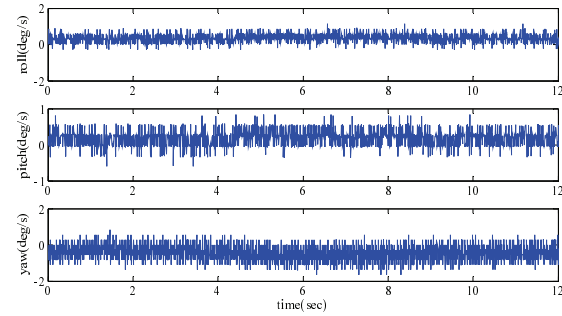
(a) 0 RPM.



(b) 1,425 RPM.



(c) 1,871 RPM.



(d) 2,850 RPM.

그림 4. 진동탐색을 위한 실험.

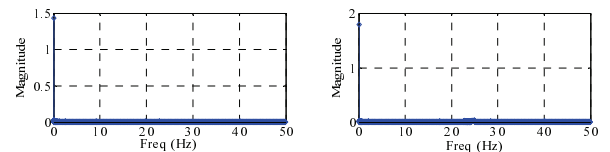
Fig. 4. Vibration detection experiments.

(2)에서, b 는 3-dB 감쇄가 생기는 대역폭을 나타내고, ω_c 는 노치 주파수를 의미한다.

디지털 노치 필터 설계를 위한 방법으로 쌍 변환법을 사용하면 (3)과 같다.

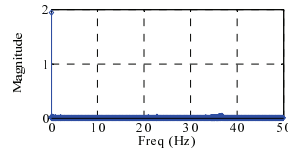
$$s = \frac{z-1}{z+1} \tag{3}$$

(3)을 (2)에 대입하게 되면, (4)가 성립하게 된다.

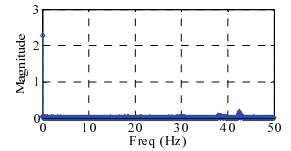


(1) 0 RPM

(2) 1,425 RPM

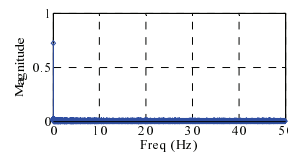


(3) 1,871 RPM

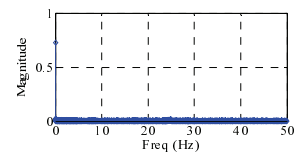


(4) 2,850 RPM

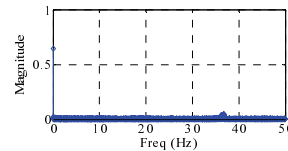
(a) Roll.



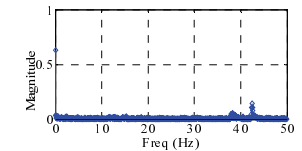
(1) 0 RPM



(2) 1,425 RPM

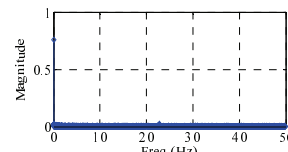


(3) 1,871 RPM

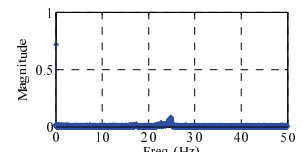


(4) 2,850 RPM

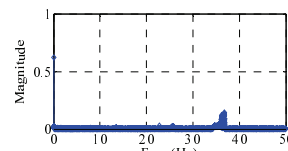
(b) Pitch.



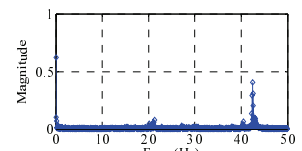
(1) 0 RPM



(2) 1,425 RPM



(3) 1,871 RPM



(4) 2,850 RPM

(c) Yaw.

그림 5. FFT 결과.

Fig. 5. FFT results.

표 2. 필터 설계 규격.

Table 2. Filter design specification.

Specifications	Values
Sampling time	0.01sec
Cutoff frequency	42.5Hz
Bandwidth	1.5Hz

$$H(z) = H(s) \Big|_{s = \frac{z-1}{z+1}} = \frac{(1 + \omega_c^2) - 2(1 - \omega_c^2)z^{-1} + (1 + \omega_c^2)z^{-2}}{(1 + \omega_c^2 + b) - 2(1 - \omega_c^2)z^{-1} + (1 + \omega_c^2 - b)z^{-2}} \tag{4}$$

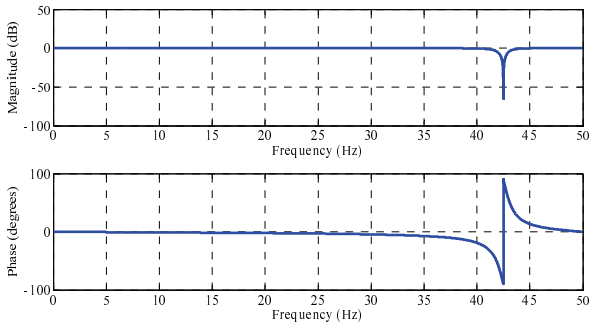


그림 6. 노치 필터 주파수 특성.

Fig. 6. Notch filter frequency characteristics.

필터 계수를 간략화하기 위한 방법으로, (5)와 같이 상수 a_1 과 a_2 를 이용한다.

$$H(z) = \frac{1}{2} \frac{(1+a_2) - 2a_1z^{-1} + (1+a_2)z^{-2}}{1 - a_1z^{-1} + a_2z^{-2}} \quad (5)$$

$$a_1 = \frac{2(1-\omega_c^2)}{1+\omega_c^2+b}, a_2 = \frac{1+\omega_c^2-b}{1+\omega_c^2+b}$$

상수 $\frac{1}{2}$ 를 무시하면, (5)는 주파수 응답에 6-dB 계인을 더한 결과와 같게 되고, 기대하고 있는 전달함수 형태인 (6)을 얻게 된다.

$$H(z) = \frac{(z^{-2}+1) - 2a_1z^{-1} + a_2(z^{-2}+1)}{1 - a_1z^{-1} + a_2z^{-2}} \quad (6)$$

상수값 a_1 , a_2 를 설계하고자 하는 노치주파수 ω_0 와 3-dB 대역폭 Ω 의 관계로 표현하면 (7)과 같다[9].

$$a_1 = \frac{2\cos\omega_0 T}{1 + \tan(\Omega T/2)}, a_2 = \frac{1 - \tan(\Omega T/2)}{1 + \tan(\Omega T/2)} \quad (7)$$

표 2에 따라, 다음의 계산 결과들을 얻게 된다.

$$\omega_0 T = 2\pi \times 42.5 \times 0.01 = 0.007\pi \quad (8)$$

$$\Omega T = 2\pi \times 1.5 \times 0.01 = 0.004\pi \quad (9)$$

$$\cos(\omega_0 T) = \cos(0.007\pi) = -0.8910 \quad (10)$$

$$\tan\left(\frac{\Omega T}{2}\right) = 0.0472 \quad (11)$$

$$\therefore a_1 = -1.7018, a_2 = 0.9099 \quad (12)$$

따라서 설계된 필터는 다음과 같게 된다.

$$H(z) = \frac{0.9550 + 1.7018z^{-1} + 0.9550z^{-2}}{1 + 1.7018z^{-1} + 0.9099z^{-2}} \quad (13)$$

설계된 노치 필터의 주파수 특성은 그림 6과 같다. 42.5 Hz 주파수 대역에서 설계 의도대로 노치 기능이 나타난다.

4. 노치 필터 성능 검증

그림 7은 노치필터 사용을 통한 주파수 영역의 성능 검증 결과이다. 노치 필터를 적용했을 때의 시뮬레이션 결과로 42.5 Hz 대역 잡음 성분이 저감됨을 확인할 수가 있다.

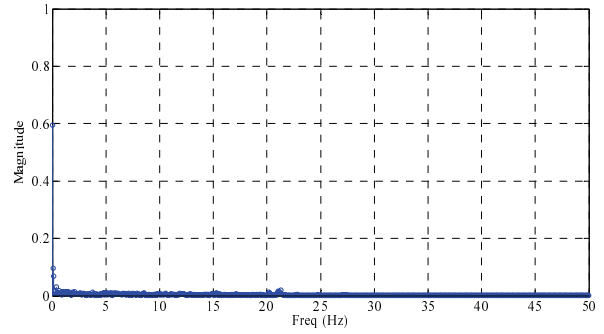
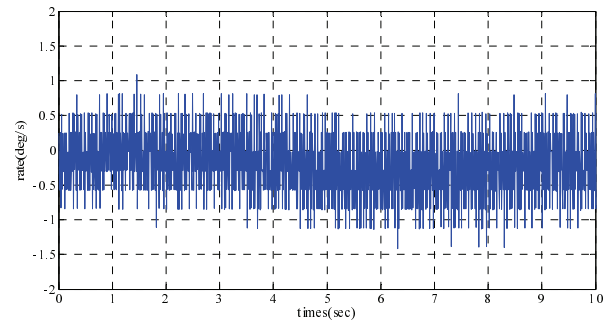
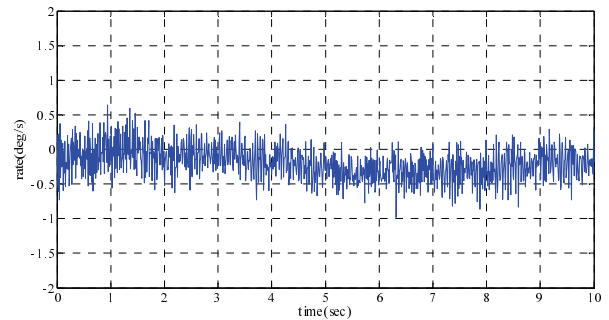


그림 7. 노치필터 성능(주파수영역).

Fig. 7. Performance of notch filter (frequency domain).



(a) Before filtering.



(a) After filtering.

그림 8. 노치 필터 성능 검증(시간영역).

Fig. 8. Notch filter performance verification (time domain).

그림 8은 시간 영역에서의 노치필터의 성능을 나타낸다. 플라이휠 2,850 rpm 회전할 때에 그림 8(a)는 필터를 사용하기 전의 시간 데이터 그림이고 그림 8(b)는 필터를 사용한 후의 시간 데이터를 나타낸다.

IV. 실험 결과

설계한 노치 필터를 외바퀴 로봇인 자이로보에 실제 적용하여 그 성능을 확인하였다. 그림 9는 적용한 제어 블록도이다. 진동의 탐색 과정에서 요 방향에 대한 진동이 중요하기 때문에 종래의 PD제어기에서 요 방향에 대한 피드백 제어 부분을 개선하였다.

그림 9에서 θ_d 는 기준 롤 각도, $\dot{\theta}_d$ 는 기준 롤 각속도, θ_f 는 피드백 롤 각도, $\dot{\theta}_f$ 는 피드백 롤 각속도, $\dot{\theta}_w$ 는 피드백 요 각속도, θ_e 는 롤 에러 각도, $\dot{\theta}_e$ 는 롤 에러 각속도, K_1

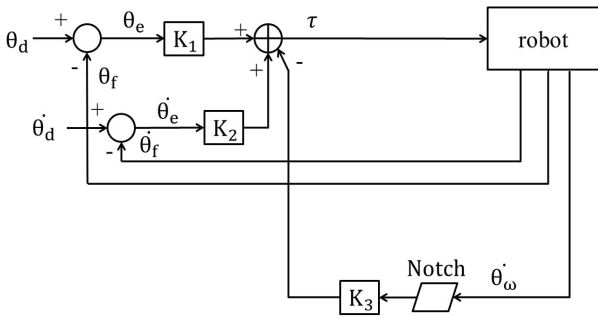


그림 9. 자이로보 제어블록도.

Fig. 9. GYROBO control block diagram.

은 비례 제어 계인, K_2 는 미분 제어 계인, K_3 는 요 미분 계인 이고 τ 는 토크 이다.

자이로보의 균형제어를 위한 비례미분제어기에서 AHRS를 이용한 피드백 값은 초당 100개의 데이터를 DSP에 제공한다. 제어에서는 롤 값에 대한 각도 정보와 속도 정보를 비례 미분 계인을 사용하여 제어하도록 하고 있고 요 값에 대한 속도 정보는 제어 성능 향상을 위해 피드백하여 사용한다. 진동 저감 필터의 위치는 요 값의 속도 정보 값에 사용하도록 개선하여 설계된 필터의 성능을 확인할 수가 있다.

실험 환경은 다음과 같다. 먼저, 실험에 적용된 로봇의 하드웨어 상태를 동일한 상태로 유지한다. 사용하는 배터리의 종류, 개수, 충전 상태를 유사하게 유지한다. 본 실험에서는 18.5 V / 450 mAh 배터리 1개만 사용하였다.

다음으로 로봇의 밸런싱 상태를 측정하는 AHRS 센서의 위치를 동일하게 유지하도록 한다. 본 실험에서는 속도제어기 상위 커버 위에 움직임이 발생하지 않도록 고정하여 실험하였다.

다음으로 플라이휠의 속도 세팅을 하고 휠의 속도가 2,850 RPM 부근에서 제어될 수 있도록 한다. 본 시스템은 속도에 대한 피드백 기능이 없으므로 속도제어기에 입력하는 속도 명령과 속도제어기가 작동하고 있는 상태에서 플라이휠의 모터 전압을 측정하는 방식으로 플라이휠의 속도를 추정할 수 있게 된다.

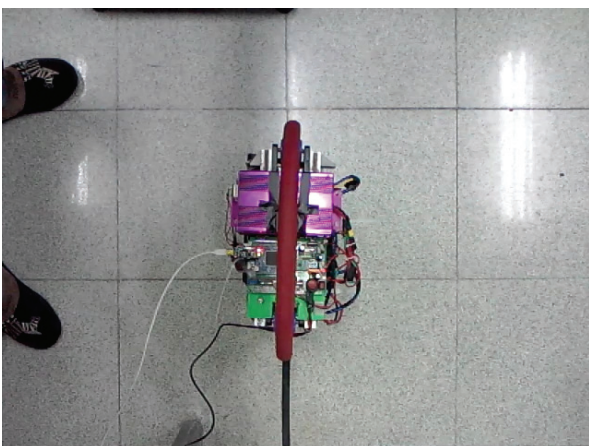
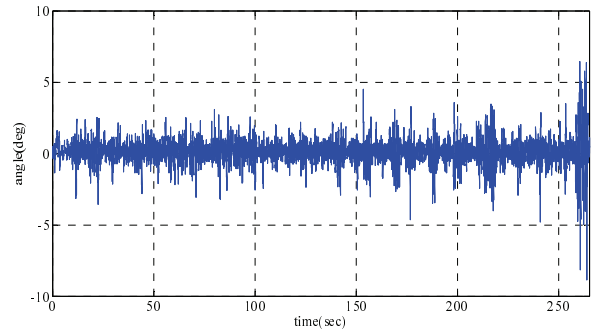
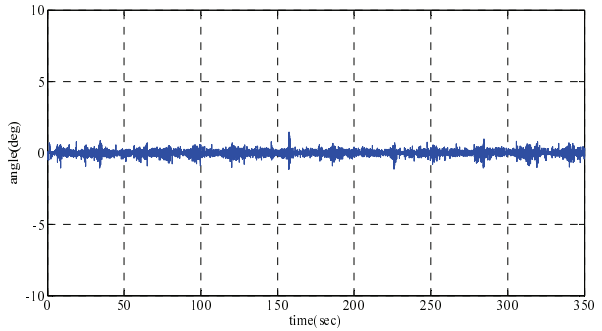


그림 10. 균형 제어 성능 실험.

Fig. 10. GYROBO balance control performance test.



(a) Before filtering.



(b) After filtering.

그림 11. 균형 제어 성능.

Fig. 11. Balancing control performance.

제어기에서 비례 계인은 1050, 미분 계인은 50, 그리고 필터 출력의 계인은 0.1을 사용하였다.

밸런싱 성능 평가 방법으로는 균형제어가 유지되는 시간과 AHRS 센서를 통해서 얻은 로봇의 롤링 각도를 비교하도록 한다. 그림 10은 균형을 유지하고 있는 로봇의 모습이다.

필터 적용전과 후의 균형제어 성능의 비교는 그림 11에 나타나 있다. 필터 적용 후의 밸런싱 각도 오차가 현저하게 줄어들음을 알 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 AHRS 센서를 활용한 진동 탐색 방법을 제시하였고 설계된 필터를 적용해봄으로써 그 성능을 확인할 수가 있었다. 진동 탐색의 방법으로는 모션제어 분야의 연구 내용과 유사하게 센서의 각속도 데이터를 활용하였고 FFT 변환을 통해서 회전체 진동의 기본 주파수를 탐색하였다. 또한 진동 저감을 위한 노치 필터를 설계하고 실제 시스템에서 실증해봄으로써 제안한 방법론의 타당성을 입증하였다. 회전체의 속도 피드백과 진동 저감을 위한 노치 필터 알고리즘이 내장되어 있지 않는 시스템에서 제한된 범위에서 진동 탐색이 가능할 수 있을 것으로 여겨진다. 또한 하나의 센서를 이용하여 본래의 기능 외의 부가적인 기능도 구현할 수 있다는 점을 확인할 수가 있었다.

REFERENCES

[1] S. M. Yang and S. C. Wang, "The detection of resonance frequency in motion control systems," *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol. 50, no. 5, pp.

- 3423-3427, Sep.-Oct. 2014.
- [2] D.-H. Lee, J. H. Lee, and J.-W. Ahn, "Mechanical vibration reduction control of two-mass permanent magnet synchronous motor using adaptive notch filter with fast Fourier transform analysis," *IET Elect. Power Appl.*, vol. 6, no. 7, pp. 455-461, 2012.
 - [3] S. Zhou and J. Shi, "Active balancing and vibration control of rotating machinery: A survey," *The Shock and Vibration Digest*, vol. 33, no. 4, pp. 361-371, 2001.
 - [4] P. Schmidt and T. Rehm, "Notch filter tuning for resonant reduction in dual inertia systems," *1999 IEEE Industry Applications Conference*, Phoenix, USA, pp. 1730-1734.
 - [5] M. Valenzuela, J. Bentley, and R. Lorenz, "Evaluation of torsional oscillations in paper machine sections," *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol. 41, no. 2, pp. 493-501, Mar.-Apr. 2005.
 - [6] C. A. Michael and A. N. Safacas, "Dynamic and vibration analysis of a multimotor DC drive system with elastic shafts driving a tissue paper machine," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 54, no. 4, pp. 2033-2046, 2007.
 - [7] W. Singhose and J. Vaughan, "Reducing vibration by digital filtering and input shaping," *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 19, no. 6, pp. 1410-1420, 2011.
 - [8] S. N. Vukosavic and M. R. Stojic, "Suppression of torsional oscillations in a high-performance speed servo drive," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 45, no. 1, pp. 108-117, 1998.
 - [9] K. Hirano, S. Nishimura, and S. K. Mitra, "Design of digital notch filters," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 22, no. 7, pp. 964-970, 1974.
 - [10] J. A. Cadzow, "Digital notch filter design procedure," *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing*, vol. ASSP-22, pp. 10-15, 1974.
 - [11] J. H. Lee and H. J. Shin, "Balancing control of a unicycle robot using ducted fans," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, vol. 20, no. 9, pp. 895-899, 2015.
 - [12] P. K. Kim and S. Jung, "Experimental studies of neural network control for one-wheel mobile robot," *Journal of Control Science and Engineering*, doi:10.1155/2012/194397, 2012.
 - [13] J. H. Park and S. Jung, "Development and control of a single-wheel robot: Practical Mechatronics approach," *Mechatronics*, vol. 23, no. 6, pp. 594-606, 2013.
 - [14] P. K. Kim, J. H. Park, M. S. Ha, and S. Jung, "Implementation and balancing control of one-wheel robot, GYROBO," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, vol. 19, no. 6, pp. 501-507, 2013.
 - [15] S. D. Lee and S. Jung, "Vibration detection and

suppression of a single-wheel system using an AHRS sensor," *Proc. of ICROS Annual Conference 2015 (in Korean)*, Daejeon, Korea, pp. 251-252, May 2015.



이 상 덕

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



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.