

# 각도 오프셋의 퍼지보상을 통한 외바퀴 이동 로봇의 균형제어

## Balancing Control of a Single-wheel Mobile Robot by Compensation of a Fuzzified Balancing Angle

하민수 · 정 슬<sup>†</sup>

Minsu Ha, and Seul Jung<sup>†</sup>

충남대학교 메카트로닉스공학과

Department of Mechatronics Engineering, Chungnam National University

### 요 약

본 논문에서는 한 바퀴 이동로봇의 균형제어를 위해 퍼지방법을 사용하였다. PD제어를 사용하여 균형을 유지하는 한 바퀴 로봇은 시간이 지남에 따라 플라이휠이 한 방향으로 기울어지게 되고 결국에는 균형이 무너지는 현상이 발생한다. 선행연구에서는 이를 해결하기 위해 게인 스케줄링 방법을 사용하였다. 본 논문에서는 퍼지방법을 사용하여 균형 각도를 보상하므로 균형 제어 성능을 높이고자 하였다. 퍼지제어를 통해 desired offset의 각도를 보상하므로 김벌이 한쪽으로 흘러 넘어지는 현상을 보완하였다. 한 바퀴 구동 이동로봇의 균형제어 실험을 통하여 제안하는 제어방식의 성능을 검증하였다.

**키워드** : 퍼지 방법, 외바퀴 로봇, 균형제어, 균형 각도 보상

### Abstract

In this paper, a fuzzy control method is used for balancing a single-wheel robot. A single-wheel robot controlled by the PD control method becomes easily unstable since the flywheel tends to lean against one direction. In the previous research, we have used the gain scheduling method. To remedy this problem, in this paper, a fuzzy compensation technique is proposed to compensate for the balancing angle. The fuzzy control method compensates offset values at the balancing angle to prevent the gimbal from falling against one direction. Experimental studies of the balancing control performance of a single-wheel mobile robot validate the proposed control method.

**Key Words** : Fuzzy method, Single-wheel robot, Balancing control, Balancing angle compensation

## 1. 서 론

최근에 이동로봇에 대한 연구가 활발해지면서 로봇의 기동성에 대한 관심도 커지고 있다. 대부분의 이동로봇에 대한 연구는 네바퀴 기반의 이동로봇을 이용하므로 안정성이 확보되어 기동성보다는 자율주행에 중점을 두는 경향이 있다.

이동로봇의 기동성에 있어서 좁은 공간이나 복잡한 곳에서는 네바퀴보다는 두바퀴로 구동하는 것이 더 효율적이다. Segway는 이러한 요구에 의해 개발된 대표적인 두바퀴 구동 이동로봇으로 많은 곳에서 사용되고 있다 [1].

이처럼 이동로봇의 바퀴의 수가 점차 줄어들어 따라 기구적으로는 간단해진 반면, 제어는 상대적으로 어려워지게 되었다. 두바퀴 로봇의 경우에는 앞뒤의 균형을 유지해야 하는 어려운 점을 해결해야 한다. 균형유지를 위해 신경망제어방식이나 퍼지 제어 방식을 이용하거나 뉴로퍼지 방식을 적용하기도 한다 [2-4].

더욱더 도전적인 것은 한 바퀴로 움직이는 로봇이다. 바퀴의 수가 하나로 줄어들어 인체 해결해야 하는 문제는 더욱 많아지고 어려워졌다. 한 바퀴로 구동하는 이동로봇은 한 바퀴 안에 모든 장치가 들어가야 하고 좌우 및 앞뒤의 균형을 이루어 무게중심이 가운데 위치하도록 해야 하므로 설계가 어렵고 제어가 도전적이다.

국내외에서 한 바퀴 로봇에 대한 연구는 많이 진행되어 오진 않았지만 점점 늘어가는 추세이다 [5-14].

Received: Nov. 19, 2013

Revised : Dec. 18, 2014

Accepted: Dec. 20, 2014

<sup>†</sup> Corresponding author(jungs@cnu.ac.kr)

본 논문은 2013년 한국연구재단 일반연구지원(NRF-2010-0024904)과 2014년 한국연구재단 기초연구(NRF-2014R1A21A11049503)의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

특히 Xu교수팀은 오래전부터 한 바퀴 구동 로봇에 대한 연구를 시작하여 선구자 역할을 해오고 있다 [6-9]. 다양한 연구를 통해 자이로 효과를 이용하는 Gyrover를 개발하여 실제 구동에 성공하였다 [8,9].

그림 1에서 보면 자이로 효과는 빠르게 회전하는 디스크를 회전방향에 수직방향으로 움직여 다른 수직방향으로 움직이는 힘이 생성하는 것이다. 이처럼 자이로 효과를 이용하기 위해서는 고속의 플라이휠이 필요하게 된다. 따라서 한 바퀴 이동로봇의 균형을 유지하기 위해서는 플라이휠이 내장된 김벌을 제어하는 것이 핵심기술이다.

국내에서는 한 바퀴 이동로봇에 대한 연구가 아직 활발하지 못하다. 충남대에서는 모델의 변경을 여러 번 거쳐 자이로보(GYROBO) 시스템을 제작하여 균형제어에 성공할 수 있었다[13,14]. 설계의 변경과 부품의 개선 등을 통한 제어방식의 개선 등을 통해 성공적인 균형제어를 할 수 있었다. 성공의 주 요인은 여러 번의 설계 수정을 거쳐 김벌의 진동을 줄이고 균형을 위해 각 하드웨어를 균형적으로 배치하고 제어방법을 개선한 것이다 [14].

제어방법으로는 선형제어기를 사용하였으나 플라이휠이 한 쪽으로 치우치는 경향이 있어 이를 해결하고자 김벌의 각도에 따른 게인 스케줄링을 통해 넘어지는 것을 방지하였다. 시간이 지남에 따라 플라이휠이 한 방향으로 기울어짐에 따라 균형이 무너지는 현상이 발생하는데 이를 해결하기 위해 기준 균형 각도값을 영으로 설정하는 대신 실험적으로 구한 오프셋 값으로 설정하였다. 이는 자이로보 시스템이 바퀴 축을 중심으로 정확하게 균형을 이루고 있지 않아서 무게 중심점이 가운데 놓이지 않기 때문이다.

따라서 이러한 구조적인 불균형을 해결하기 위해 각도 오프셋 값을 실험을 통하여 구하였다. 하지만 이 오프셋 값은 실험환경이 바뀔 때마다 실험적으로 구해야 하는 번거로움이 따르게 된다.

본 논문에서는 한 바퀴 이동로봇의 균형제어를 위해 퍼지방법을 사용하였다. 매번 시스템에 맞게 오프셋 값을 구하는 대신에 퍼지 방법을 사용하여 자동적으로 오프셋 값을 산출하도록 구현하였다. 퍼지방법을 사용하여 각도를 보상하므로 김벌이 한쪽으로 흘러 넘어지는 현상을 보완하였다. 균형제어 실험을 통하여 제안하는 제어방식의 성능을 검증하였다.

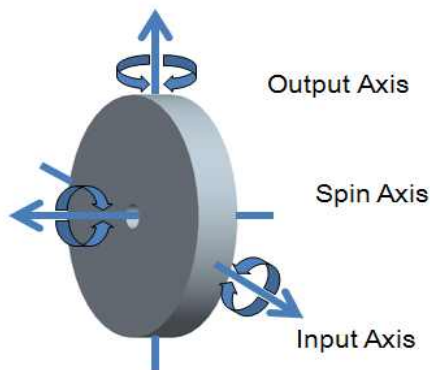


그림 1. 자이로 효과  
Fig. 1. Gyroscopic effect

## 2. 자이로보 시스템

그림 2는 개선된 자이로보 시스템을 보여준다. 이전의 모델보다 바퀴의 크기가 커져 바퀴 안의 공간이 커짐을 알 수 있다. 한 바퀴 안에 배터리를 포함하여 모든 하드웨어가 내장되어 있다. 양 옆의 바는 넘어질 경우를 대비한 안전바이다. 모두 세 개의 구동 모터가 있는데 하나는 전체 바퀴를 움직이는 드라이브 모터이고 두 개의 모터는 김벌에 사용되어 플라이휠을 고속으로 회전시키고 김벌을 움직여 균형을 유지하는데 각각 사용된다.

이 중에서 균형을 유지시키는 핵심 제어부는 틸팅 구동부이다. 고속의 플라이휠을 포함하는 김벌을 회전시켜 자이로스코프 효과를 발생시키고, 이로 인해 시스템의 기울기를 제어한다. 드라이브 구동부는 전진 후진을 하기위한 구동부로서 제어부에서 개루프로 제어된다.

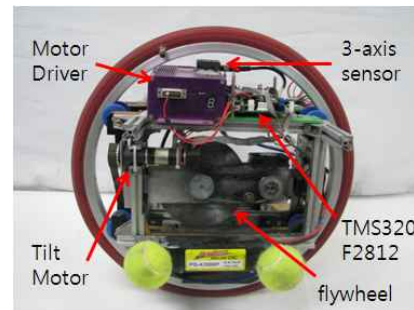


그림 2. 자이로보 시스템  
Fig. 2. GYROBO System

균형을 감지하는 센서로는 자이로 센서를 사용하였으며, 제어 하드웨어는 DSP를 사용하였다. 제어 주기는 50Hz로 하였다. 표 1에 자이로보의 자세한 제원이 나타나 있다.

표 1. 자이로보 하드웨어 제원  
Table 1. Hardware specification of GYROBO

Gyrobo Specifications	Value
Microprocessor	TMS320F2812
SamplingTime (Hz)	50Hz
Mass (Kg)	11.2
Diameter (m)	0.45
Width (m)	0.15
Flywheel Specifications	Value
Mass (Kg)	2.1
Diameter (m)	0.15
Width (m)	0.017
Speed (rpm)	5,700

최종 하드웨어의 구성은 그림 3과 같다. 자이로 센서를 통해 얻은 기울기각도 값은 DSP의 제어를 거쳐 틸트 모터의 토크로 변환되어 김벌의 틸팅각을 제어한다. 플라이휠의 속도는 개회로로 제어되어 약 5,700 rpm의 속도를 유지하도록 한다.

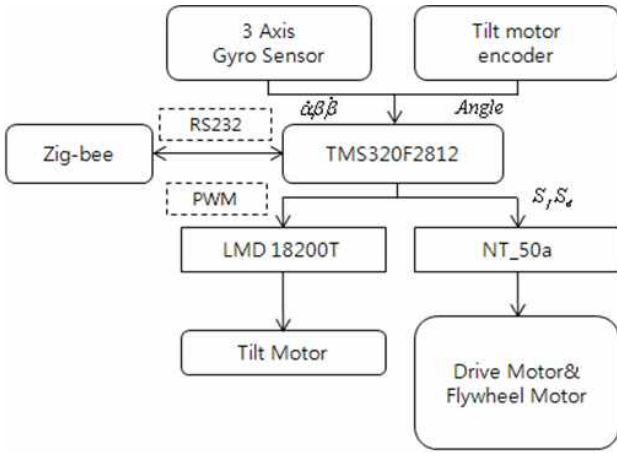


그림 3. 전체 시스템 블록 다이어그램  
Fig. 3. Overall system block diagram

### 3. 제어방법

#### 1. PD 제어

자이로보의 균형제어를 위해서는 기울어진 각도를 세우도록 제어기를 설계하면 된다. 균형을 유지하기 위해서는 플라이휠을 일정한 속도로 돌리고 플라이휠이 위치한 김벌의 각도를 조절하는 것이다.

따라서 시스템의 유일한 제어 입력은 자이로보의 기울기각도,  $\beta$ 와 기울기 속도,  $\dot{\beta}$ 를 이용하는 PD제어이다.

$$u = k_{D\beta} \dot{e} + k_{P\beta} e \tag{1}$$

여기서  $e = \beta_d - \beta$ , 즉 기울어진 각도의 오차이고  $k_{D\beta}, k_{P\beta}$ 는 제어 이득값이다. 그림 4에 PD 제어 블록도가 나타나 있다.

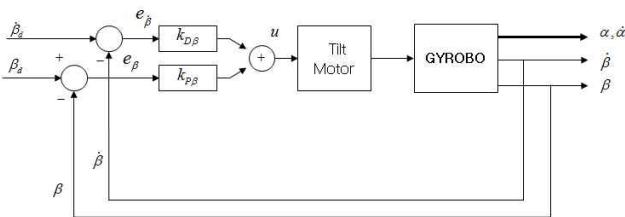


그림 4. PD 제어 블록 다이어그램  
Fig. 4. PD control block diagram

자이로보는 균형을 유지하기 위해 휠을 헤딩방향의 좌우로 움직이게 되므로 yaw방향이 틀어지게 되는 경우가 발생한다. 따라서 yaw 방향을 제어요소에 포함시키면 좀 더 안정적으로 자세를 유지하게 된다.

$$u = k_{D\beta} \dot{e} + k_{P\beta} e - k_{D\alpha} \dot{\alpha} \tag{2}$$

여기서  $\dot{\alpha}$ 는 yaw 각속도이고  $k_{D\alpha}$ 는 제어 이득값이다. 그림 5에 보면 yaw 방향 제어를 추가한 제어 방식이 나타나 있다.

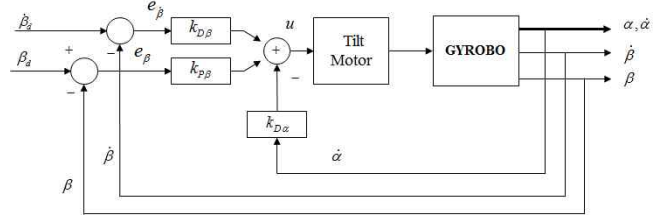


그림 5. Yaw제어를 추가한 PD 제어블록 다이어그램  
Fig. 5. PD control block diagram with yaw control

하지만 PD제어만 사용하는 경우에 자이로보의 무게 중심점이 정확하게 중심에 놓여있지 못함으로써 금방 쓰러지게 된다.

#### 2. 퍼지 제어

매번 각도 보상값을 실험적으로 구해야 하는 불편을 해결하기 위해 김벌의 움직임을 퍼지방법을 사용하여 제어한다. 그림 6은 퍼지 알고리즘을 사용하여 기준각도의 보상 각도값을 결정하는 블록도이다. 퍼지법칙은 김벌의 기울어진 각  $e_{tilt}$ , 즉 틸트 각도에 의해 설정이 되고 퍼지추론, 비퍼지화를 과정을 통해 그에 따른 보상 값이 출력되도록 구현한다.

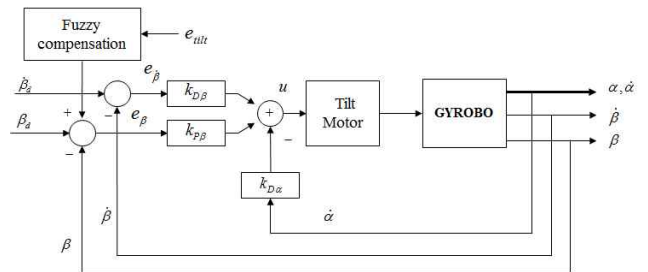


그림 6. 퍼지 보상 제어블록 다이어그램  
Fig. 6. Fuzzy compensation block diagram

그림 7은 설계된 퍼지 법칙이다. 7개의 퍼지 셋을 사용하였다. 표 2는 퍼지 법칙을 나타낸다. 퍼지 법칙은 실험적으로 구해 최적화 하였다.

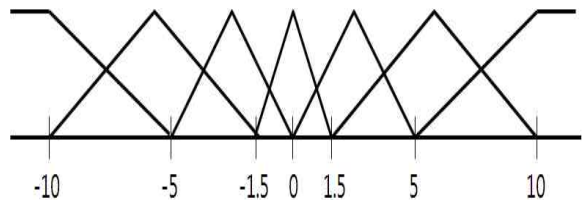


그림 7. 퍼지 법칙  
Fig. 7. Fuzzy rules

표 2. Fuzzy rule  
Table 2. Fuzzy rule

Position	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
Offset angle	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB

4. 실험 결과

1. 실험 환경

초기에는 자이로보를 세우기 위해 손으로 균형을 유지시키고 센서의 값을 영점으로 한다. 제자리에서 균형을 유지하는 실험을 수행하였다. 먼저 PD제어방식으로 제어하였고 그 다음에 같은 PD제어 기반에 입력을 퍼지로 보상하는 방식으로 제어하였다.

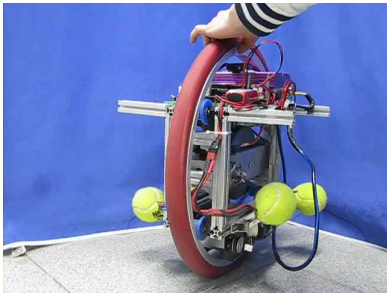


그림 8. 자이로보 실험설치  
Fig. 8. Experimental setup for GYROBO

2. PD 제어 방식

그림 9는 PD제어 방식을 사용하여 균형을 유지하는 각도를 나타낸다. 자이로보는 14초 동안은 균형을 잘 유지하지만 그 이후에는 불안정하여 쓰러지게 된다. 이는 자이로보가 균형을 유지하면서 김벌이 좌우로 움직이게 되는데, 균형에 의한 미세한 오차에 의해 김벌이 한쪽 방향으로 치우지게 되어 결국 넘어지는 결과를 초래하게 된다. 그림 10에 플라이휠의 각도가 나타나 있다. 0도 근처에서 시작하여 100도 근처까지 계속 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 플라이휠이 한 방향으로 계속 치우치는 것을 나타내는데 이로 인해 자이로보는 결국에는 넘어진다.

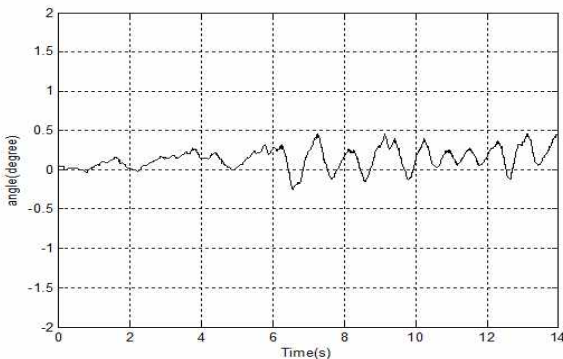


그림 9. 기울기 각도  
Fig. 9. Lean angle

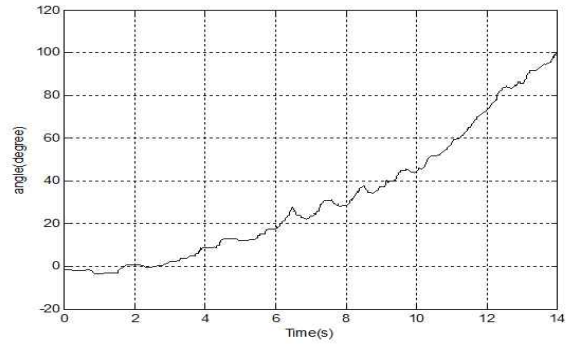
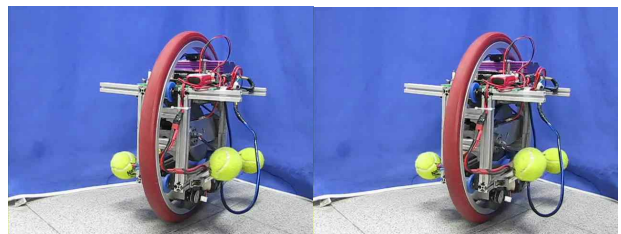


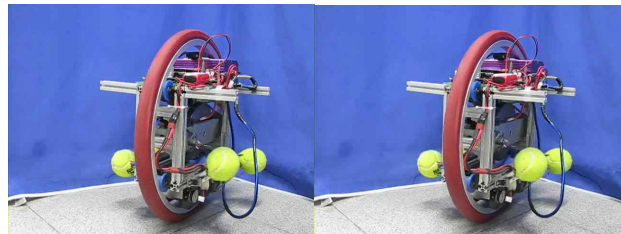
그림 10. 플라이 휠 틸트 각도  
Fig. 10. Tilt angle of the flywheel

3. 퍼지제어 방식

다음으로 퍼지셋을 적용하여 실험하였다. 실험 동영상이 그림 11에 나타나 있다. 시간별로 캡춰한 사진이지만 균형을 잘 유지하는 것을 볼 수 있다. 그림 12에서 보면 퍼지 셋을 사용하는 경우에 균형각도의 오차는 ±0.5도 이내로 나타나는 것을 볼 수 있다.



(a) 10 seconds (b) 30 seconds



(c) 30 seconds (d) 50 seconds

그림 11. 균형유지실험결과  
Fig. 11. Balancing result

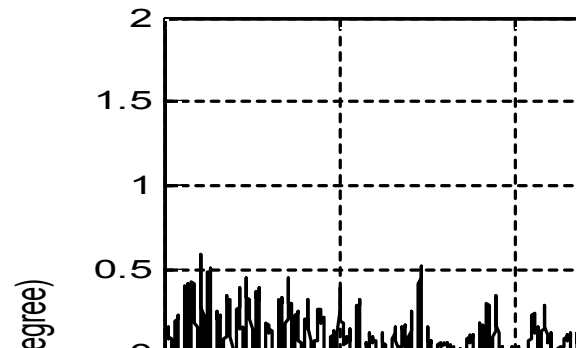


그림 12. GYROBO 시스템의 기울기 각도  
Fig. 12. Lean angle of the GYROBO system

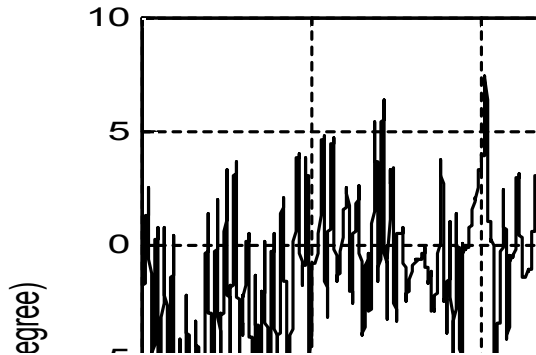


그림 13. 김벌의 틸팅 각도  
Fig. 13. Tilting angle of the gimbal system

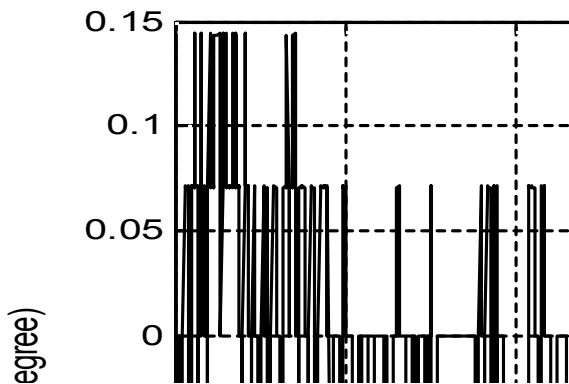


그림 14. 퍼지 보상 신호  
Fig. 14. Compensation signal by fuzzy logic

그림 13의 틸팅 각도 역시 발산하지 않고 15도 이내에 머무르는 것을 볼 수 있다. 그림 10과 비교해 보면 큰 차이가 있음을 알 수 있다. 그림 14는 출력된 퍼지 보상 값이다. 보상값은  $\pm 0.15$ 도 안에서 이루어지는 것을 볼 수 있다.

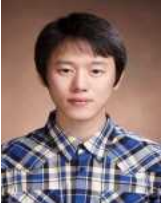
### 5. 결론

본 논문에서는 한 바퀴 이동로봇의 균형제어를 안정적으로 수행하기 위해 기준각도를 보상하는 퍼지방법을 적용하였다. 기존의 PD제어만 사용하면 플라이휠이 한 쪽 방향으로 치우치게 되어 넘어지는 것을 개인 스케줄링을 통한 방법으로 해결하였으나 상황에 따라 개인이 달라지는 문제가 있었다. 이를 보완하기 위해 퍼지방법을 통해 기준 균형각도를 보상하여 실험한 결과 안정적으로 제어가 되는 것을 실험으로 확인하였다. 플라이휠의 움직임 범위를 제한하여 제어범위를 유지하였고, 이와 동시에 PD제어를 통해 기울기를 제어하였다.

### References

- [1] "Segway.", <http://www.segway.com>
- [2] D. H. Song, G. H. Lee, S. Jung "Neural network compensation technique for standard PD-like fuzzy controlled nonlinear systems", *International Journal of Fuzzy logic and Intelligent Systems*, vol. 8, no.1, pp. 68-74, 2008.
- [3] H. W. Kim and S. Jung, "Fuzzy Logic Application to a Two-wheel Mobile Robot for Balancing Control Performance", *International Journal of Fuzzy logic and Intelligent Systems*, vol.12, no.2, pp. 154-161, 2012.
- [4] G. H. Lee and S. Jung, "Neuro-Fuzzy Control of Inverted Pendulum System for Intelligent Control Education", *International Journal of Fuzzy logic and Intelligent Systems*, vol.9, no.4, pp. 309-314, 2009.
- [5] S. J. Tsai, E. D. Ferreira, and C. J. Raredis, "Control of the gyrover: a single-wheel gyroscopically stabilized robot," *IEEE IROS*, pp. 179-184, 1999.
- [6] Y. S. Xu, K. W. Au, G. C. Nandy, and H. Ben Brown, "Analysis of actuation and dynamic balancing for a single wheel robot," *Proc. IEEE Int. Conf on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1789-1794, 1998.
- [7] Y. S. Xu, K. W. Au, and H. B. Brown, "Dynamic mobility with single-wheel configuration," *The international Journal of Robotics Research*, pp. 728-738, 1999.
- [8] Y. S. Xu and K. W. Au, "Stabilization and path following of a single wheel robot," *IEEE/ASME Trans. on Mechatronics*, vol. 9, no. 2, pp. 407-419, 2004.
- [9] Y. S. Xu and Y. S. Oh, "Control of single wheel robots," *Springer*, 2005.
- [10] Z. Zhu, A. A. Mamun, P. Vadakkepat, and T. H. Lee, "Line tracking of the GYROBOT-A Gyroscopically stabilized single-wheeled robot," *IEEE Conf on Robotics and Biomimetics*, pp. 293-298, 2006.
- [11] T. B. Lauwers, G. A. Kantor, and R. L. Hollis, "A dynamically stable single-wheeled mobile robot with inverse mouse-ball drive," *IEEE Conf on Robotics and Automations*, pp. 2884-2889, 2006.
- [12] U. Nagarajan, A. Mampetta, G. A. Kantor, and R. L. Hollis, "State transition, balancing, station keeping, and yaw control for a dynamically stable single spherical wheel mobile robot," *IEEE Conf on Robotics and Automations*, pp. 998-1003, 2009.
- [13] P.-K. Kim, Y. Kim, and S. Jung, "Implementation of single-wheeled robots: GYROBO," *Journal of Institute of Electronics Engineers of Korea*, vol. 44, no. 4, pp. 35-41, 2007.
- [14] J. H. Park and S. Jung, "Development and control of a single-wheel robot: Practical mechatronics approach", *Mechatronics*, vol. 23, pp. 594-606, 2013.

저 자 소 개



하민수(Minsu Ha)  
2011년 : 한밭대학교 제어계측공학과 졸업.  
2014년 : 충남대학교 메카트로닉스공학과 석사졸업.  
2014년~현재: 석사후 병역특례 연구원

관심분야 : 지능형 로봇, 외바퀴 로봇 응용.  
Phone : +82-42-821-7232  
Fax : +82-42-823-4919  
E-mail : kakashi08@naver.com



정 슬 (Seul Jung)  
1988년: 미국 웨인 주립대 전기 컴퓨터 공학과 졸업.  
1991년: 미국 캘리포니아대 데이비스 전기 컴퓨터공학과 석사 졸업.  
1996년: 미국 캘리포니아대 데이비스 전기 컴퓨터공학과 박사 졸업.  
1997년~현재: 충남대학교 메카트로닉스 공학과 교수

관심분야 : 지능 시스템 및 지능 로봇, 밸런싱 시스템응용, 서비스 로봇, 미래형 지능형 운송시스템, 로봇교육.  
Phone : +82-42-821-6876  
Fax : +82-42-823-4919  
E-mail : jung\_s@cnu.ac.kr