

덕티드 팬을 이용한 외바퀴 자전거로봇의 균형 제어

Balancing Control of a Unicycle Robot using Ducted Fans

이 종 현, 신 혜 정, 정 슬*

(Jong Hyun Lee¹, Hye Jung Shin², and Seul Jung^{3,*})

¹R&D Division, LG Korea

²Research Institute, Hankook Tire

³Department of Mechatronics Engineering, Chungnam National University

Abstract: This paper presents the balancing control of a unicycle robot using air power. Since the robot has one wheel to move forward and backward, the balancing control is quite challenging. To control the balancing angle, the accurate angle estimation by a tilt and a gyro sensor is required *a priori*. A complementary filter is implemented to eliminate the defects of two sensors and to fuse together to estimate an accurate balancing angle. The optimal design of air ducts is found empirically. Experimental studies of the balancing control of a unicycle robot confirm that the robot is well regulated without falling down.

Keywords: balancing control, unicycle robot, air power, duct design

I. 서론

이동로봇은 다양한 로봇의 중요한 한 축으로 오래 전부터 연구되어 왔다. 이전의 연구에서는 주로 자율주행 기반의 탐사를 위해 사용되어왔다. 예컨대, 화성탐사나 극한지역 탐사 등에서 주도적인 역할을 해왔다[1]. 최근에는 서비스 로봇을 중심으로 차세대 전기자동차에 이르기까지 이동로봇에 대한 연구가 매우 활발하다.

특히 주목할 것은 전기자동차와 이동로봇이 하나로 합쳐지는 수송체 분야이다. 자동차는 전기로 구동되고 이동로봇은 자동차처럼 사람을 운반하는 수송체 형태로 발전하고 있어 사용하는 기술들을 공유하게 되는 것이다.

실제적인 이동로봇의 수송체로서의 상업화 분야를 살펴보면 군사용으로 많이 개발되고 있다. 이에 반해 Segway는 대표적인 민간용 수송체 시스템이다. Segway의 경우는 좁은 공간에서의 편리한 조작과 조향을 위해 두 바퀴로 설계되어 구동하므로 안정적인 균형 유지가 핵심기술이다. 운전자가 안정한 상태에서 목적지까지 움직일 수 있어야 하므로 균형을 유지하는 로봇의 메커니즘과 제어가 중요하게 대두된다[2]. Segway와 같은 두 바퀴 형태의 로봇에 대한 연구가 매우 활발하게 진행되고 있어 다양한 종류의 로봇 및 수송체 시스템이 소개되고 있다[3-12].

더욱 도전적인 것인 한 바퀴로 구동하는 이동로봇의 제어이다. 그림 1에는 외바퀴자전거 로봇의 개념이 나타나 있다.

한 바퀴로 몸체를 지탱하여 균형을 유지하며 움직인다.

두 바퀴 이동로봇의 경우 측면(롤) 방향으로는 안정적인라 진행(피치) 방향의 균형 제어가 중요하다. 한 바퀴로 바퀴가 되면 피치방향 뿐만 아니라 롤 방향도 균형제어를 해야 하는 어려운 점이 있다. 대부분의 한 바퀴 구동 이동로봇의 경우에 고속의 플라이휠을 이용하는 자이로 효과를 이용한다.

최근에 발표된 외바퀴자전거(Unicycle) 형태의 'Murata Girl'은 많은 사람들의 관심을 받았다[13]. 일본에서는 외바퀴 자전거 자율주행을 위한 메커니즘을 제안하였고[14] 국내에서는 역진자의 원리를 이용한 리액션 휠을 이용하여 외바퀴 자전거로봇의 균형을 제어하였다[15]. 다소 구조가 다른 외바퀴 로봇에 대한 연구도 진행되었다. Xu는 오랜 연구를 통해 바퀴 안에 모든 하드웨어를 장착한 Gyrover를 개발하였다[16]. 자이로 효과를 이용하여 몸체가 없는 한 바퀴로봇에 대한 지속적인 연구결과를 보여주었다. 균형제어 뿐만아니라 주행 및 제자리에서 일어서는 등의 실험결과를 발표하였다.

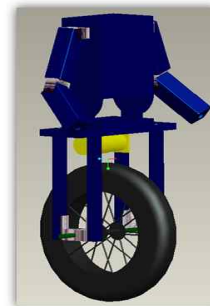


그림 1. 외바퀴 자전거로봇 개념.

Fig. 1. Unicycle robot.

* Corresponding Author

Manuscript received May 21, 2014 / revised June 16, 2014 / accepted July 24, 2014

이종현: LG(ljh1000je@nate.com)

신혜정: 한국타이어(loyem15@hankooktire.com)

정슬: 충남대학교 메카트로닉스공학과(jungs@cnu.ac.kr)

* 본 논문은 2008년도 한국연구재단 일반연구자 사업(NRF-2006-521-D00166)의 일부 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

국내에서도 한 바퀴만으로 구성된 로봇에 대한 연구가 진행되었다. GYROBO는 Gyrover와 같이 자이로 효과를 이용한 것으로 균형 및 주행을 성공적으로 보여주었다[17].

하지만 자이로 효과를 이용하려면 고속의 플라이휠이 필요하게 되고 리액션 휠을 이용하려면 상대적으로 큰 휠이 필요하게 되어 시스템이 무거워지고 에너지 효율이 떨어지는 점이 단점이 있다.

본 논문에서는 바람을 이용하여 균형을 유지하는 새로운 개념의 외바퀴 자전거 로봇을 소개 하고자한다[18]. 그림 2에 보여진 것처럼 로봇의 측면 양쪽에 덕티드 팬(ducted fan)이 달려 있어 바람을 만들어 내고 그 바람의 힘을 통해 롤방향의 균형을 제어하게 된다. 최적의 바람힘을 만들어 내기 위해 다양한 바람통을 실험적으로 구별하였으며, 균형 각도를 정확하게 검출하기 위해 보상필터를 사용하였다. 센서의 피치방향의 제어는 두 바퀴 구동 로봇과 마찬가지로 바퀴의 움직임을 통해 제어한다. 바람을 통해 로봇이 균형을 유지하는 것을 검증하기 위해 외바퀴자전거를 제작하고 제어하여, 실험적으로 증명하였다.

II. 외바퀴 자전거 로봇

1. 전체 구성

외바퀴 자전거로봇의 전체구조는 그림 2와 같다. 외바퀴 자전거 로봇은 바퀴와 덕티드팬 그리고 로봇 팔이 달린 몸체로 구성되어 있다. 바퀴의 전후 구동은 DC모터를 사용하고 롤방향의 균형은 2개의 덕티드팬을 사용한다. 그림 3은 바퀴부의 구동부를 나타낸다. 타이밍벨트를 모터에 연결하여 바퀴의 움직임을 구동한다.

2. 하드웨어 구성

전체 하드웨어는 주 제어기를 중심으로 센서 그리고 모터부로 구성되어 있다. 그림 4는 전체 하드웨어의 구성이 나타나 있다. 주제어기로는 8 비트 프로세서 AVR (Atmega128)를 사용하였고 균형을 유지하기 위한 각도 검출 센서로는 자이로와 틸트 센서를 사용하였다.

센서 신호는 디지털로 변환하여 AVR에서 제어알고리즘을 통해 각 모터를 제어하게 된다. 균형각도를 정확하게 검출하기 위해서 융합알고리즘으로 complementary 필터를 사용하여 각 센서의 단점을 보완하였다[4].

제어주기는 100Hz로 하였다.

3. 센서융합

균형각도를 검출하기위한 센서로는 틸트센서(SA1)와 자이로 센서(ENV05G)를 사용하였다. Gyro센서는 고주파 응답 특성이 좋으나 적분을 통해 각도값을 얻기 때문에 적분오차가 발생하게 된다. Tilt센서는 정확한 각도값을 얻을 수 있지만, 잡음과 같은 고주파 응답특성이 나쁘다. 따라서 두 가지 센서의 장점만을 얻어내기 위해 그림 5와 같은 complementary 필터를 구성하였다. 낮은 주파수에서는 틸트 센서 정보를 사용하고 높은 주파수에서는 자이로 센서의 정보를 사용한다. 낮은 주파수에서 자이로센서의 드리프트를 제거하고, 상대적으로 높은 주파수에서의 틸트센서의 잡음 문제를 해결할 수 있는 Complementary 필터를 적용하여 각도를 측정하였다[5].

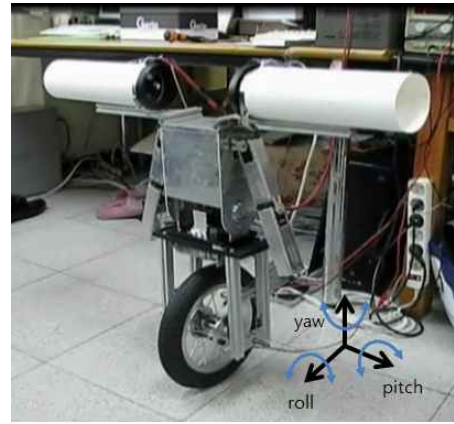


그림 2. 유니사이클 로봇.

Fig. 2. Unicycle robot.

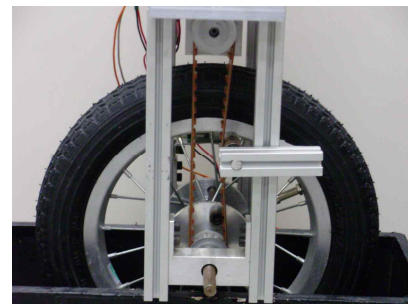


그림 3. 바퀴구동부.

Fig. 3. Wheel actuation mechanism.

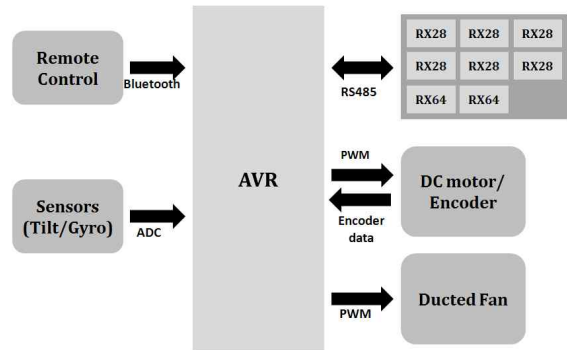


그림 4. 제어 하드웨어 구조.

Fig. 4. Control hardware block diagram.

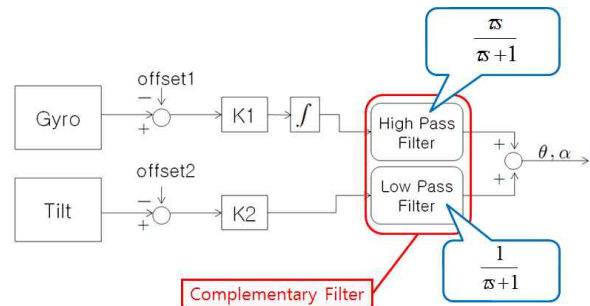


그림 5. Complementary 필터 블록다이어그램.

Fig. 5. Complementary filter block diagram.

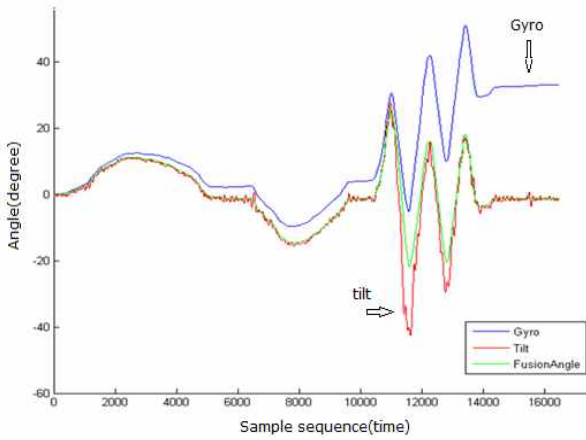


그림 6. 센서 테스트.

Fig. 6. Sensor test.

그림 6은 자이로와 틸트 데이터를 나타낸다. 또한 동시에 두 센서 데이터를 필터로 융합한 신호를 나타낸다. 그림에서 보면 자이로 센서 응답의 경우 드리프트가 발생하는 것을 볼 수 있다. 또한 틸트 센서의 경우에는 고주파 잡음이 포함되어 있는 것을 알 수 있다. 보상 필터를 통과한 신호는 이러한 문제점을 해결한 신호가 검출되는 것을 알 수 있다.

III. 균형제어

1. Pitch 방향 제어

Pitch 방향 자세제어는 두 바퀴 구동 역진자 시스템의 제어 방식과 같다[5]. Pitch 방향으로 θ 만큼의 기울기가 발생하면 기울기가 발생한 방향으로 움직여줌으로써 θ 값을 0으로 만들어 균형을 유지한다. 균형만 유지하는 것이 아니라 위치 또한 제어하여야 하므로 제어블록은 그림 7과 같다.

피치 각을 제어하는 제어기로는 간단한 PD 제어를 사용하고 위치제어는 PID 제어를 사용하였다. 밸런싱 각에 PD 제어를 사용한 이유는 PID 제어기의 경우 누적 오차가 발생하여 밸런싱 오차가 더욱 커지게 되고 이는 위치제어에 영향을 주어 전체적으로 불안정해지는 현상을 야기시키는 것을 방지하기 위함이다.

본 논문에서 위치제어는 수행하지 않았다.

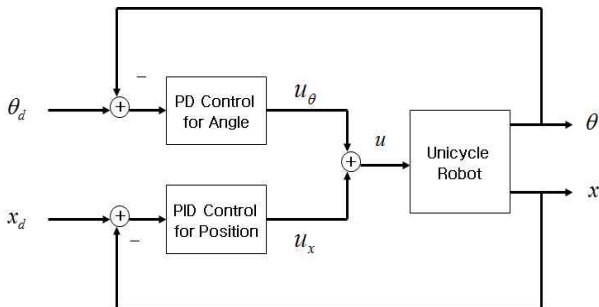


그림 7. 피치 방향 제어 블록 다이어그램.

Fig. 7. Pitch control block diagram.

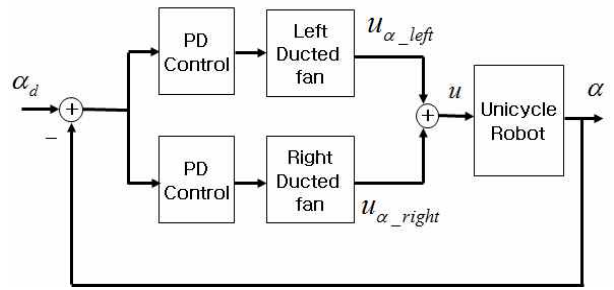


그림 8. Roll 방향 제어 블록 다이어그램.

Fig. 8. Roll angle control block diagram.

표 1. 피치제어 제어기 이득값.

Table 1. Controller gains for pitch direction.

	K_P	K_D
피치각도	210	1.3
위치	2.15	6

표 2. 롤제어 제어기 이득값.

Table 2. Controller gains for roll direction.

	K_P	K_D
오른쪽 fan	83	27
왼쪽 fan	101	28

2. Roll 방향 제어

본 연구의 핵심은 롤방향의 제어이다. 외바퀴자전거로봇의 Roll 방향 자세 제어를 위해 회전자 구동기의 반작용력에 의한 간접제어, Gyroscopic effect를 이용한 자세유지 등과 같은 연구가 진행되어 왔다. 본 논문에서는 덕티드팬을 장착하여 덕티드팬의 추력에 의한 자세제어를 한다. 따라서 바람을 일으키는 덕티드팬의 회전을 조절하므로 롤방향을 제어하게 된다. 그림 8에 롤방향의 PD 제어방식을 사용하는 제어블록도가 나타나 있다.

그림 8의 제어 블록 다이어그램과 같이 오른쪽과 왼쪽의 PD 제어기 이득값을 설정하여 덕티드팬을 회전시킨다. 덕티드팬의 회전을 통한 바람의 힘은 외바퀴 자전거 로봇의 균형을 제어하게 된다.

실험에 사용된 제어기 이득값은 표 1과 2에 나타나 있다. 제어기 이득값은 실제 실험을 통해 구한 값들이다. 표 2에서 보게 되면 오른쪽 왼쪽 팬의 이득값이 다른 것을 알 수 있다. 이는 오른쪽 왼쪽이 정확하게 같지 않기 때문이다.

71

IV. 실험

1. 롤방향 균형 실험

먼저 바람을 이용하여 롤방향의 균형을 유지할 만한 힘이 충분히 발생하는지에 대한 실험을 수행하였다. 바람의 힘은 매우 비선형으로 그 크기를 일정하게 하기위한 바람통을 설계하는 것이 중요하다. 그림 9는 Roll 방향에 대한 자세제어 실험을 보여준다. 균형을 유지하고 있을 때 손으로 외란을 주어도 균형이 잘 유지되는 것을 볼 수 있다.

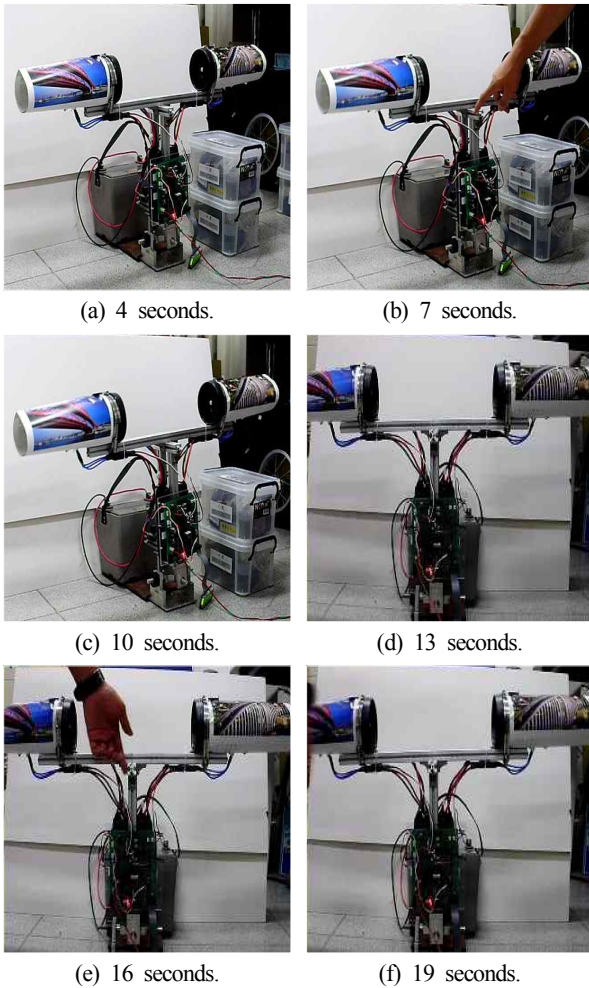


그림 9. Roll방향 자세유지 실험.
Fig. 9. Roll angle control experiment.

팬에 의한 측면 제어의 경우 충분한 바람을 통해 팔의 움직임을 제어하는 것이 중요하다. 바람의 힘이 일정치 않아 제어에 어려움이 따른다. 따라서 바람을 한 방향으로 모으고 크게 낼 수 있도록 바람통을 원통형으로 설계하는 것이 중요하다. 원뿔과 같은 모양을 포함하여 다양한 모양의 바람통을 설계하여 실험하였지만 그림 9의 모양과 같이 일자형이 가장 성능이 좋게 나타났다. 따라서 그림 10에 나타난 것처럼 일자의 원통형으로 바람통을 만들어 실험하였다.

실험을 통해 바람의 힘을 이용하여 롤방향의 제어가 가능함을 확인하였다. 바람통은 실험을 통해 원통형으로 길게 만드는 것이 제어하기에 수월하고 제어할 수 있는 각도가 가장 크게 나타났다.

2. 균형제어 실험

다음 실험은 바람통을 외바퀴 자전거에 얹어 전체 시스템의 균형을 유지하는 실험, 즉 롤방향과 피치방향의 각을 제어하는 실험을 수행하였다. 그림 10은 15초간 균형을 유지하고 있는 동영상의 일부분을 3초 간격으로 나타낸 것이다. 각 프레임간 차이가 별로 나타나지 않는 것은 로봇이 제자리에서 균형을 잘 유지하고 있기 때문이다. 롤 방향의 움직임이 잘 제어되어 넘어지지 않는 것을 볼 수 있

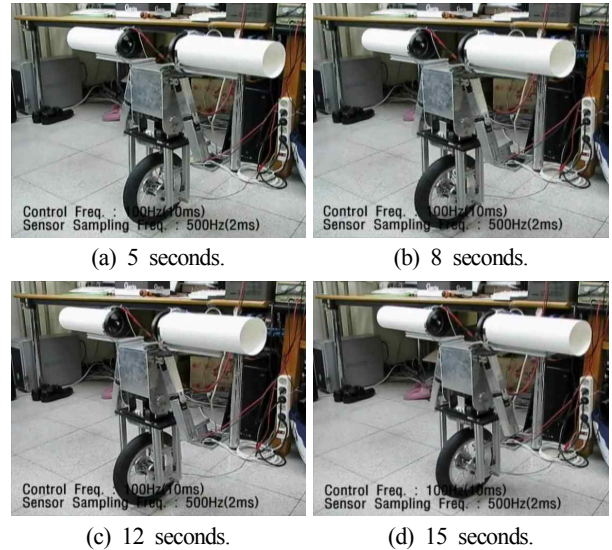


그림 10. 균형제어 실험.
Fig. 10. Balancing control experiment.

다. 마찬가지로 피치방향으로도 넘어지지 않기 위해 바퀴가 앞뒤로 조금씩 움직이는 것을 동영상상을 통해 확인할 수 있다[18].

V. 결론

본 논문에서는 외바퀴 자전거로봇의 균형제어에 대해 실험적으로 검증하였다. 먼저 센서 융합을 통해 균형 각도를 정확하게 추출할 수 있도록 하였으며, 바람의 힘으로 충분한 추력을 만들어 낼 수 있는가를 실험적으로 구하였고 최적의 바람통을 설계하였다. 균형제어를 위해서는 Pitch 방향과 Roll 방향의 자세제어를 실험을 통해 확인하였다. Pitch 방향은 바퀴의 구동에 의한 제어로 Roll 방향에 비해 제어가 수월하였다. Roll 방향은 덕티드팬의 추력에 의한 제어로 자세 유지가 가능하였지만, 이동로봇의 하중이 무거울 경우 제어 가능한 값의 범위가 작아짐을 확인하였다. 하지만 요방향 제어에 대한 실험은 수행하지 않았다.

향후 연구로는 시스템 설계시 불필요한 하중을 감소함으로써 제어 성능을 높이고 안정적인 좌우 자세제어를 하며, 주행, 방향 전환 및 여러 환경에서의 제어가 가능하도록 하는 연구가 수행될 예정이다.

REFERENCES

[1] "Mars pathfinder," <http://mars.jpl.nasa.gov>
 [2] "Segway," <http://www.segway.com>
 [3] F. Grasser, A. Darrigo, S. Colombi, and A. Rufer, "JOE: A mobile, inverted pendulum," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 49, no. 1, pp. 107-114, 2002.
 [4] H. J. Lee and S. Jung, "Balancing and navigation control of a mobile inverted pendulum robot using sensor fusion of low cost sensors," *Mechatronics*, vol. 22, no. 1, pp. 95-105, 2012.
 [5] K. Pathak, J. Franch, and S. Agrawal, "Velocity and po-

sition control of a wheeled inverted pendulum by partial feedback linearization,” *IEEE Trans. on Robotics*, vol. 21, pp. 505-513, 2005.

- [6] S. H. Jeong and T. Takayuki “Wheeled inverted pendulum type assistant robot: design concept and mobile control,” *IEEE IROS*, pp. 1932-1937, 2007.
- [7] R. Imamura, T. Takei, and S. Yuta, “Sensor drift compensation and control of a wheeled inverted pendulum mobile robot,” *IEEE Workshop on Advanced Motion Control*, pp. 137-142, 2008.
- [8] S. S. Kim and S. Jung, “Control experiment of a wheel-driven mobile inverted pendulum using neural network,” *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, vol. 16, no. 2, pp. 297-303, 2008.
- [9] C. C. Tsai, H. C. Huang, and S. C. Lin, “Adaptive neural network control of self-balancing two-wheeled scooter,” *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 4, pp. 1420-1428, 2010.
- [10] C. H. Huang, W. J. Wang, and C. H. Chiu, “Design and implementation of fuzzy control on a two-wheel inverted pendulum,” *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 7, pp. 2988-3001, 2011.
- [11] 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.
- [12] H. W. Kim and S. Jung, “Experimental studies of controller design for a car-like balancing robot with a variable mass,” *Journal of Korea Institute of Intelligent Systems*, vol. 20, no. 4, pp. 469-475, 2010.
- [13] “Murata Girl,” <http://www.murataboy.com/>
- [14] R. Nakajima, T. Tsubouchi, S. Yuta, and E. Koyanagi, “A development of a new mechanism of an autonomous unicycle,” *Proc. of the IROS*, pp. 906-912, 1997.
- [15] J. W. Ahan, M. G. Kim, and J. M. Lee, “Control of a unicycle robot using a non-model based controller,” *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 20, no. 5, pp. 537-542, 2014.
- [16] Y. S. Xu, K. W. Au, G. C. Nandy, and H. B. 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.
- [17] 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 (in Korean)*, vol. 19, no. 6, pp. 501-507, 2013.
- [18] ISEE, “<http://isee.cnu.ac.kr>”



이 종 현

2010년 충남대 메카트로닉스공학과 졸업. 현재 LG전자 R&D 연구원. 관심분야는 Sensor응용을 통한 지능형 로봇 개발, 구동 부품 정밀제어, 산업 자동화 시스템, Microwave 응용기술.



신혜정

2010년 충남대 메카트로닉스공학과 졸업. 현재 한국타이어 중앙연구소 연구원. 관심분야는 지능 로봇 제어, 자동 제어 시스템, 밸런싱 로봇의 차량 응용.



정슬

1988년 미국 웨인 주립대 전기 및 컴퓨터 공학과 졸업. 1991년 미국 캘리포니아대 데이비스 전기 및 컴퓨터 공학과 석사. 동 대학 박사. 1997년~현재 충남대학교 메카트로닉스 공학과 교수. 관심분야는 지능제어 및 지능로봇 시스템, 장애우를 위한 보행 및 휠체어 로봇 설계 및 개발, 가정용 서비스 로봇 개발, 무인인 수송체 시스템, 로봇교육.