

# 경사로에서 세그웨이 로봇의 주행 속도를 통한 경사각 추정

## Estimate the Inclination Angle using Traveling Speed of Segway Robot on the Slope

정 희 인, 이 상 용, 이 장 명\*

(Hee-In Jeong<sup>1</sup>, Sang-Yong Lee<sup>2</sup>, and Jang-Myung Lee<sup>3,\*</sup>)

<sup>1</sup>Department of Electrical Engineering, Pusan National University

<sup>2</sup>Department of Interdisciplinary Program in Robotics, Pusan National University

<sup>3</sup>Department of Electrical Engineering, Pusan National University

**Abstract:** This paper proposes an angle estimation of Segway robot for the slop driving. Most of Segway robot was controlled by pose control of keeping robot's balance and motor control of driving. In motor control, we analyzed Segway robot kinetically and estimated an angle of inclination using the velocity that depends on input force. In pose control, also, we used PD controller and evaluated a stability of controller through MATLAB simulation. Assuming the robot keeps its balance stably using controller, we could linearize dynamics. We could obtain the result through the experiment which estimates an angle using the velocity of Segway robot that is derived from linearized dynamics.

**Keywords:** Inverted pendulum robot, dynamics, SEGWAY, PD control, two wheel pendulum

### I. 서론

현재 지구상의 대기오염과 화석연료의 고갈, 유가의 급등이 큰 문제로 대두되는 가운데 순수 전기로 움직이는 이동수단인 세그웨이가 개발되었다[1-3]. 세그웨이는 Dean Kamen에 의해 개발 되었으며, 지금도 많은 사람들이 이동수단으로 이용 중이다.

이러한 바퀴를 이용하여 이동하는 바퀴구동형 로봇들은 우리의 실생활에 다양하게 접목시킬 수 있다. 그 중 개인 가정이나 병원, 공장 및 다양한 시설에서 서비스를 제공하는 바퀴구동형 서비스로봇을 들 수 있다[4]. 바퀴구동형 로봇 중 본 연구에서 연구한 세그웨이는 역진자 로봇으로 동적 안정화 기술이라는 무게의 균형에 대한 원리를 이용한다[5-7]. 무게균형 원리는 막대기를 손바닥 위에 세웠을 때, 막대기가 쓰러지지 않도록 손바닥을 막대기가 쓰러지려는 방향으로 움직이게 함으로써 중심을 잡는 원리와 비슷하다. 즉 막대기와 사람의 손 그리고 근육 등이 모터, 센서, 마이크로 프로세서 등과 같은 동작을 하는 것이다.

세그웨이 로봇은 센서를 통하여 중력 변화를 수치화하여 기울기 및 가속도를 측정하여 무게 중심의 균형을 조절한다. 본 논문에서는 세그웨이 로봇의 무게중심을 잡기 위한 각종 센서들의 오차 및 외란 등을 보상하여 더욱 안정화 하는 관점의 연구[8], 또는 평지에서의 자세제어 등과 같은 연구와

차별화를 두기 위한 경사면에서의 주행에 관해 연구를 목표로 한다.

기존의 경사면 자세제어에 관한 연구는 경사면의 기울기에 대한 정보를 추가적인 센서를 통하여 기울기 값을 얻는다[9]. 하지만 본 연구에서는 추가적인 센서 없이 세그웨이 로봇이 현재의 기울기를 도출한다. 그리하여 도출한 기울기를 통하여 경사면에서의 주행에 있어서 안정적인 속도를 유지할 수 있도록 하는 것이 목표이다.

본 논문은 II 장은 세그웨이 로봇의 제어기의 성능을 확인하기 위한 Lagrange Equation을 이용하여 동역학을 유도한다. III 장은 세그웨이 로봇의 시스템 구성 및 자세제어를 하기 위한 제어기 설계이다. IV 장은 경사로 주행을 위한 힘을 수식화 하였다. V 장은 실험을 통한 검증이고, 마지막 VI 장에서 결론으로 마무리한다.

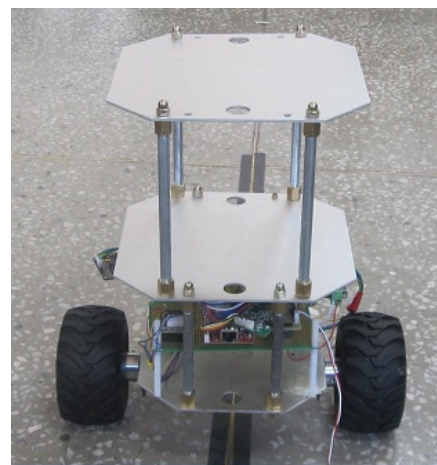


그림 1. 세그웨이 로봇.

Fig. 1. Segway robot.

\* Corresponding Author

Manuscript received December 13, 2013 / revised February 19, 2014 / accepted September 5, 2014

정희인: 부산대학교 전자전기컴퓨터공학과(heein1696@pusan.ac.kr)

이상용: 부산대학교 로봇관련협동과정(sangyong1696@pusan.ac.kr)

이장명: 부산대학교 전자공학과(jmlee@pusan.ac.kr)

※ 이 논문은 2014년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2010-0024129)

※ 이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2013R1A1A2021174).

## II. 동역학

세그웨이는 차륜형 역진자 시스템으로서 바퀴와 몸체로 나누어 생각할 수 있다. 로봇의 움직임을 나타내기 위해서는 각 부분의 적용 되는 토크 및 힘을 구해야 한다. 힘으로 구성되어 있는 값을 구하면 토크에 의하여 로봇의 움직임을 나타낼 수 있다. 동역학을 구하는 방법으로는 뉴턴-오일러(Newton-Euler) 방법과 오일러-라그랑지(Euler-Lagrange)가 있다. 본 연구에서는 Lagrange equation을 이용하여 시스템의 동역학 모델을 제시하고, 실험을 통하여 결과를 평가한다.

Lagrange equation은 식 (1)과 같다.

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial L}{\partial q} = F_q \quad (1)$$

여기서  $L = T - V$ 로 운동에너지와 위치에너지의 차로 정의된다. 위치에 대한 좌표 값과 회전 관성을 알아야 운동에너지와 위치에너지를 구할 수 있다. 위치정보를 알아내기 위해 다음과 같이 좌표축을 설정하였다.

그림의 변수들에 대한 설명은 아래와 같다.

그림 2와 그림 3을 이용하면 다음과 같은 좌표를 얻을 수 있다.

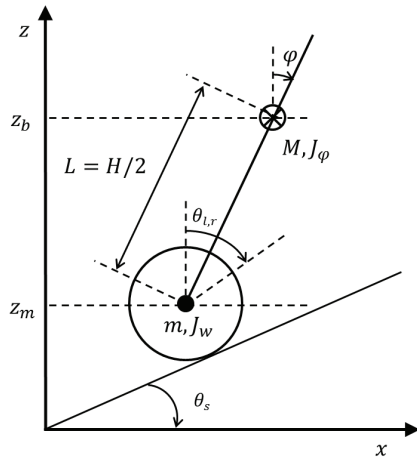


그림 2. 경사로위의 세그웨이 로봇 도식.

Fig. 2. Segway Robot Model on the Slope.

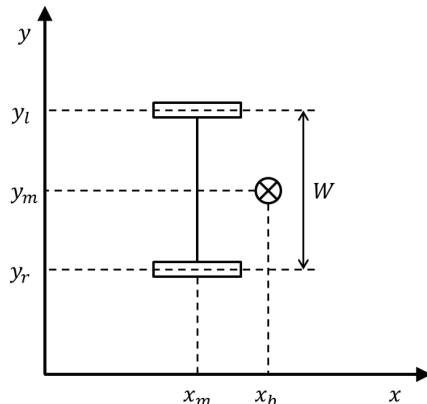


그림 3. 세그웨이 로봇의 위치 좌표.

Fig. 3. Position of Segway Robot.

표 1. 세그웨이 로봇의 변수.

Table 1. Variable of Segway Robot.

변수	설명
$z_b$	몸체 질량중심 높이
$\theta_{l,r}$	좌우 바퀴 회전각
$x_l, y_l, z_l$	좌측 바퀴 위치
$x_r, y_r, z_r$	우측 바퀴 위치
$x_b, y_b, z_b$	몸체 질량중심 위치
$x_m, y_m, z_m$	좌우 바퀴 중점 위치
$\psi$	몸체 경사각
$\theta_s$	경사로 경사각

$$\begin{aligned} (x_l, y_l, z_l) &= \left( R\theta_l \cos \theta_s, y_m + \frac{W}{2}, R + R\theta_l \sin \theta_s \right) \\ (x_r, y_r, z_r) &= \left( R\theta_r \cos \theta_s, y_m - \frac{W}{2}, R + R\theta_r \sin \theta_s \right) \\ (x_b, y_b, z_b) &= (R\theta_{l,r} \cos \theta_s + L \sin \psi, y_m, R + R\theta_{l,r} \sin \theta_s + L \cos \psi) \end{aligned} \quad (2)$$

식 (2)의  $R$ 은 반지름이고,  $H$ 는 몸체의 높이이다.

직선주행에서의 바퀴의 회전각, 바퀴의 위치 및 바퀴 중점의 위치는 엔코더 값을 이용해 읽어 올 수 있으며, 몸체 경사각  $\psi$ 는 자이로센서를 통해 얻을 수 있다. 또한 직선 주행에서  $\theta_l$ 과  $\theta_r$ 은 같은 값을 가지지만 수식의 직관성을 위해 따로 표기하였다.

세그웨이 로봇의 운동에너지는 병진 운동 에너지와 회전 운동 에너지로 구성된다.

병진운동 에너지는 로봇이 시간에 따라 지면에서 변위를 가지는 운동을 할 때 생긴다. 이 에너지는 다음 식과 같이 좌-우 바퀴와 몸체의 병진운동 에너지의 합으로 구성된다.

$$\begin{aligned} T_1 &= \frac{1}{2} m (\dot{x}_l^2 + \dot{y}_l^2 + \dot{z}_l^2) + \frac{1}{2} m (\dot{x}_r^2 + \dot{y}_r^2 + \dot{z}_r^2) \\ &\quad + \frac{1}{2} M (\dot{x}_b^2 + \dot{y}_b^2 + \dot{z}_b^2) \end{aligned} \quad (3)$$

세그웨이 로봇의 회전하는 물체는 양쪽 바퀴와 몸체이다. 따라서 세그웨이 로봇의 회전운동 에너지는 바퀴와 몸체의 회전운동에너지의 합이며 다음과 같다.

$$T_2 = \frac{1}{2} J_\omega \dot{\theta}_l^2 + \frac{1}{2} J_\omega \dot{\theta}_r^2 + \frac{1}{2} J_\psi \dot{\psi}^2 \quad (4)$$

$T_1$ 은 병진운동에 관한 운동에너지이고,  $T_2$ 는 회전운동에 관한 운동에너지를 나타낸다. 식 (3)에서  $m$ 은 바퀴의 질량이고,  $M$ 은 몸체의 질량, 식 (4)의  $J_\omega$ 는 바퀴의 회전관성,  $J_\psi$ 는 몸체의 회전관성을 의미한다.

위치에너지는 바퀴와 몸체의 위치에너지의 합으로 (5)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} V &= 2mg(R + R\theta_{l,r} \sin \theta_s) \\ &\quad + Mg(R + R\theta_{l,r} \sin \theta_s + L \cos \psi) \end{aligned} \quad (5)$$

식 (5)에서  $g$ 는 중력 가속도를 의미한다.

표 2. 세그웨이 로봇의 파라미터.

Table 2. Parameter of the Segway robot.

$R$	$0.0625\text{ m}$
$L$	$H/2$
$M$	$2.4\text{ kg}$
$m$	$0.370\text{ kg}$
$g$	$9.8\text{ m/s}^2$
$H$	$0.311\text{ m}$
$J_\theta$	$0.001445\text{ kg}\cdot\text{m}^2$
$J_\psi$	$0.01934\text{ kg}\cdot\text{m}^2$

라그랑지안  $L$  은 운동에너지에서 위치에너지를 뺀 값이며  $\theta_i$  와  $\theta_r$  이 같은 값임을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 L &= T_1 + T_2 - V \\
 &= mR^2\dot{\theta}^2 + \frac{1}{2}MR^2 + \frac{1}{2}ML^2\dot{\psi}^2 \\
 &\quad + MRL\dot{\theta}\dot{\psi}\cos(\theta_s + \psi) + J_\theta\dot{\theta}^2 + \frac{1}{2}J_\psi\dot{\psi}^2 \\
 &\quad - 2mgR - 2mgR\theta\sin\theta_s - MgR \\
 &\quad - MgR\theta\sin\theta_s - MgL\cos\psi
 \end{aligned} \quad (6)$$

바퀴 회전에 대한 Lagrange equation은 아래와 같다. 위치에너지와 앞에서 구한 운동에너지를 Lagrange equation 에 대입하여 계산하면 동역학 방정식을 도출 할 수 있다.

구한 동역학 방정식은 아래와 같다.

$$\begin{aligned}
 \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}}\right) - \frac{\partial L}{\partial \theta} &= F_\theta \\
 (2mR^2 + MR^2 + 2J_\theta)\ddot{\theta} + LMR\dot{\psi}\cos(\theta_s + \psi) \\
 - LMR\dot{\psi}^2\sin(\theta_s + \psi) - 2(n + M)g\sin\theta_s &= F_\theta
 \end{aligned} \quad (7)$$

$F_\theta$  는 양쪽 바퀴 힘의 합을 뜻한다.

$$F_\theta = F_l + F_r \quad (8)$$

모터 힘은 PWM을 통해 제어하고 모터 각각의 최대 출력은 1Kgf·Cm이며 두 바퀴 출력의 합이  $F_\theta$  로 측정되는 것이며, 일정한 값이 나올 수 있도록 하여 속도를 조절 할 수 있다.

세그웨이 로봇의 파라미터 값들은 다음과 같다.

여기서  $J_\theta$  는 바퀴 관성모멘트로  $J_\theta = mR^2/2$  로 계산하였고,  $J_\psi$  는 몸체 경사각 관성 모멘트로  $J_\psi = ML^2/3$  으로 계산하였다

### III. 시스템 및 제어기

#### 1. 시스템 구성

세그웨이 로봇은 DC모터를 이용하여 Pitch축을 제어하여  $\psi$  를 0으로 수렴 시키게 함으로써 두 바퀴를 이용하여 균형 잡힌 자세를 유지한다.

그림 4는 세그웨이 로봇의 시스템 구성도를 나타낸 것이다. 자이로센서로부터 각도 데이터를 MCU가 넘겨받아 시스템 제어기의 입력으로 사용된다. 입력으로 받은 데이터는 제

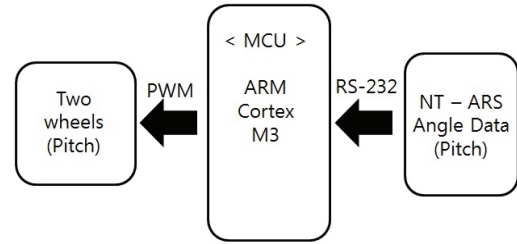


그림 4. 세그웨이 로봇의 시스템 구성.

Fig. 4. Overall system of the Segway robot.

어를 이용하여 모터로 입력 될 신호인 PWM으로 변환한다. 몸체 기울기에 따라 변환된 PWM신호를 통해 기존 모터 출력 값에 더해주면 기존 모터 출력 값에서 몸체 기울기에 따라 흔들리는 형태의 출력 값을 보이게 된다.

#### 2. 제어기

제어를 위해 PD제어기를 사용하였다. PD 제어기는 이미 많은 산업 현장에서 사용할 뿐만 아니라 간단한 구조를 가지고 있으며 제어성능이 매우 우수하다[10,11].

그림 5는 세그웨이 로봇은 pitch 축 자세제어를 하기 위한 제어기이다. 제어기의 입력은 자이로센서를 통해 얻은 세그웨이 로봇의 현재 pitch축 값을 초기 입력으로 한다. 피드백 되어진  $\psi$  는 error 값으로 적용한다.  $\psi$  가 0°가 되도록 만들어 안정적으로 균형을 잡을 수 있도록 PWM값을 조정하여 로봇에 입력한다.

P제어는 비례제어로 error 값을 P 이득 값과 곱하여 제어 값을 출력한다. P 이득 값에 의하여 Overshoot 가 발생하게 되는데, 이 Overshoot 을 감소시키기 위하여 D 항의 이득 값을 이용한 미분제어로 감소시킨다. PD 제어기에 대한 적합성을 판단하기 위해 그림 5와 같이 MATLAB으로 시뮬레이션 하였다.

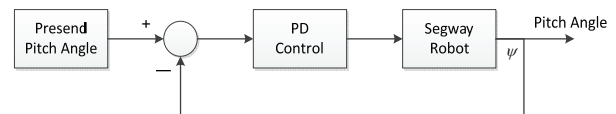


그림 5. 제어기 시스템.

Fig. 5. PD controller system.

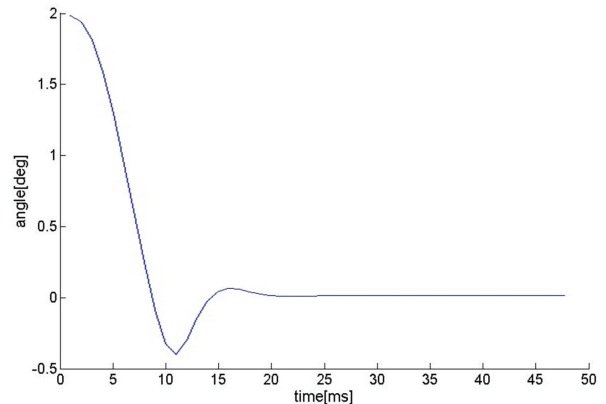


그림 6. 자세제어 시뮬레이션.

Fig. 6. Attitude control simulation.

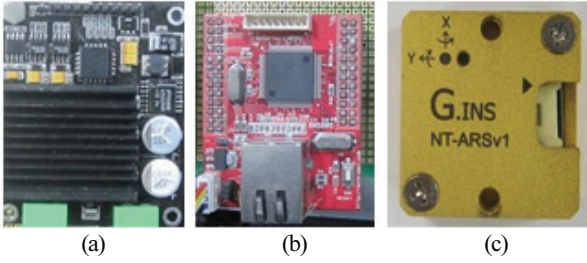


그림 7. 세그웨이 로봇의 하드웨어.

Fig. 7. Hardware of the Segway robot.

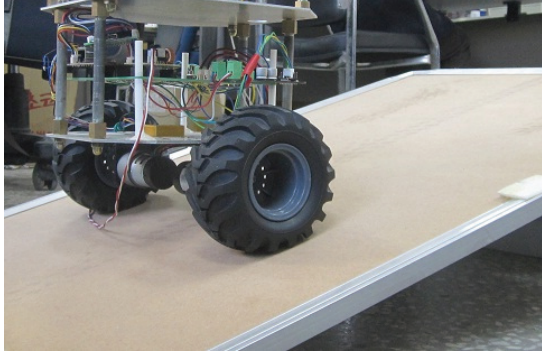


그림 8. 경사로 주행 시험 환경 구성.

Fig. 8. Configuration test environment for driving at slope.

#### IV. 경사로 주행

세그웨이의 로봇은 PD 제어를 통해서 몸체 경사각  $\psi$  를 0도로 수렴시키도록 한다. 이러한 특징을 이용해서 앞에서 구한 식 (7)의 동역학 방정식을 선형화 시킬 수 있다. 결과적으로  $\psi$  가 0으로 수렴하면  $\sin\psi$  는  $\psi$  로 수렴하고  $\cos\psi$  는 1로,  $\dot{\psi}^2$  과  $\ddot{\psi}$  은 0으로 수렴 하게 된다. 따라서 다음 식과 같이 정리 될 수 있다.

$$(2mR^2 + MR^2 + 2J_o)\ddot{\theta} - 2(n + M)g \sin\theta_s = F_\theta \quad (9)$$

위 식을  $\theta_s$  에 관해 다시 정리하면 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\theta_s = \sin^{-1} \frac{(2mR^2 + MR^2 + 2J_o)\ddot{\theta} - F_\theta}{2(m + M)g} \quad (10)$$

위 식에서 각 가속도  $\ddot{\theta}$  은 시간에 따른 속도 변화량으로 엔코더를 통해 측정 가능한 값이며  $F_\theta$  는 모터에 입력 되는 힘(PWM)이고 나머지 변수들은 이미 알고 있는 값이다. 따라서 시간에 따른 속도를 통해 경사로의 각도를 유추 할 수 있게 된다.

#### V. 실험

본 연구에서 연구된 시스템은 각 각 모터드라이버와 MCU(ARM Cortex M3), 자이로센서로 구성하였다.

평지가 아닌 경사가 존재하는 그림 8과 같은 환경에서 실험 하였으며, 경사각은 10도, 15도, 20도로 정하였다.

세그웨이 로봇은 균형을 유지하여야 하는 성질 때문에 경사각의 각을 알아내기 힘들다. 하지만 본 연구에서 식 (10)을

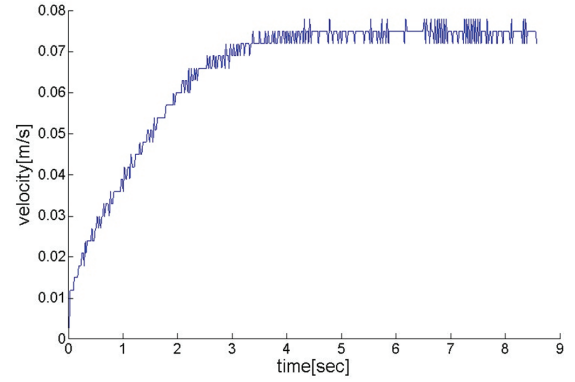


그림 9. 10도 경사각 주행.

Fig. 9. Driving of 10 degrees inclination angle.

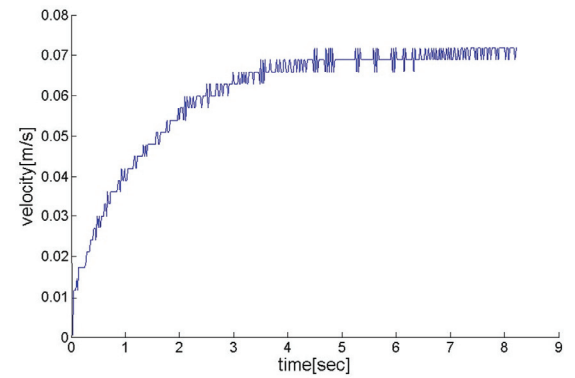


그림 10. 15도 경사각 주행.

Fig. 10. Driving of 15 degrees inclination angle.

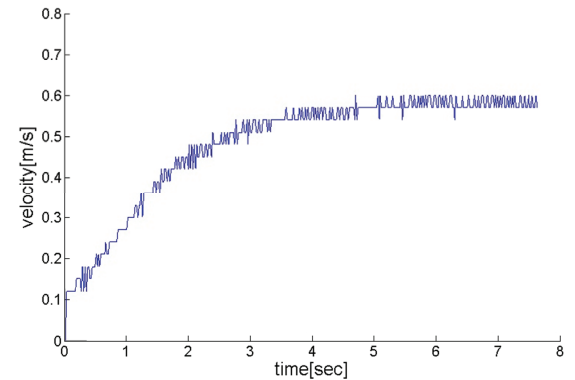


그림 11. 20도 경사각 주행.

Fig. 11. Driving of 20 degrees inclination angle.

통하여 세그웨이 로봇이 경사면을 올라가면서 현재 경사로의 기울기를 유추한다. 즉 모터의 토크와 로봇의 무게, 현재 속도, 중력 등의 파라미터를 이용하여 현재의 경사 각을 유추해본다.

그림 9에서 그림 14까지 경사면에서의 세그웨이 속도와 유추된 기울기를 나타내었다. 경사각이 클수록 속도 변화량 및 최대 속도가 줄어드는 것을 볼 수 있고, 그에 따른 각도를 나타낼 수 있다. 하지만 각도에 대해서는 자이로센서의 오차 및 마찰력과 기타 외란 때문에 실제 경사로의 각도와 오차를 보이는 결과를 얻을 수 있다.



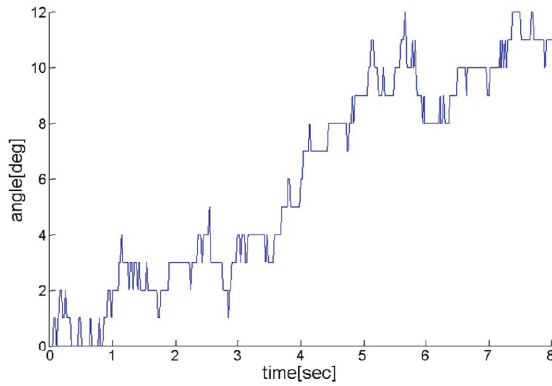


그림 12. 10도 경사각 유추.

Fig. 12. Estimate inclination angle of 10 degrees.

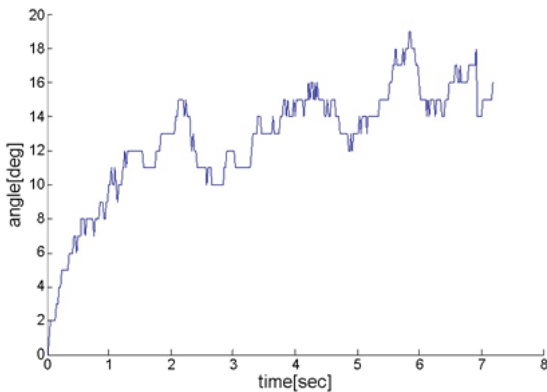


그림 13. 15도 경사각 유추.

Fig. 13. Estimate inclination angle of 15 degrees.

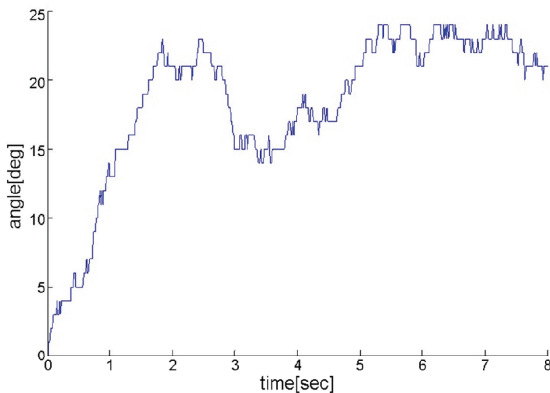


그림 14. 20도 경사각 유추.

Fig. 14. Estimate inclination angle of 20 degrees.

## VI. 결론

본 논문은 경사도가 존재하는 지면에서 세그웨이 로봇의 주행을 목표로 연구하였다. 세그웨이 로봇 시스템의 특성을 고려 하였으며, 세그웨이 로봇의 물리적 해석을 통해 동역학 방정식을 유도 하여 제어시스템에 적용하였다. 많은 연구 논문을 보면 대부분이 평탄한 지면에서의 자세제어 연구가 주를 이루었으며, 경사가 존재하는 환경에 대한 연구는 많이 이루어지지 않았다. 이러한 환경에서 주행을 하기 위해서는 지면의 기울기 정보를 알아야 한다. 하지만 세그웨이 로봇의

특성상 무게 중심이 몸체 아래쪽에 가깝게 위치하여야 하기 때문에 별도의 센서 사용하는 것이 좋지 않다. 따라서 본 논문에서처럼 경사면에서의 주행속도 값을 통하여 실시간 경사각을 추적할 수 있다는 것을 확인하고, 실시간으로 경사각의 정보를 얻음으로써 경사각 주행을 좀 더 안정인 속도로 주행을 가능하게 하였다.

본 논문에서도 보았지만 실시간 경사면의 각을 추적은 가능하나 그 값이 실제 값과 오차가 적어야 더욱 정확한 제어가 가능하다. 향후 실시간 경사 값에 대한 오차를 줄이기 위한 보상 알고리즘을 연구 할 계획이다. 또한 안정적인 직선 주행뿐만 아니라 곡선 주행 환경에서의 연구도 진행 해 볼 계획이다.

## REFERENCES

- [1] H. Azizan and M. Jafarinasab, "Fuzzy control based on LMI approach and fuzzy interpretation of the rider input for two wheeled balancing human transporter," *IEEE Proc. of ICCA Control and Automation*, pp. 192-197, 2010.
- [2] K. M. Goher and M. O. Tokhi, "A new configuration of two wheeled vehicles: Towards a more workspace and motion flexibility," *IEEE International Systems Conference*, pp. 524-528, 2010.
- [3] W. Zhong and H. Rock, "Energy and passivity based control of the double inverted pendulum on a cart," *IEEE Proc. of International Conference on Control Applications*, pp. 896-901, 2001.
- [4] Y. Hada, K. Takeuchi, H. Gakuhari, and E. I. Hemeldan, "Delivery service robot using distributed acquisition, actuators and intelligence," *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2997-3002, 2004.
- [5] D. Voth, "Segway to the future autonomous mobile robot," *IEEE Intelligent Systems*, vol. 20, no. 3, pp. 5-8, 2005.
- [6] K. Pathak, J. Franch, and S. K. Agrawal, "Velocity and position Control of a wheeled Inverted Pendulum by Partial Feedback Linearization," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 21 no. 3, pp. 505-513, 2005.
- [7] S. S. Kim and S. Jung, "Control experiment of a wheel driven mobile inverted pendulum using neural network," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 16 no. 2, pp. 297-303, 2008.
- [8] H. J. Lee and S. Jung, "Gyro sensor drift compensation by Kalman filter to control a mobile inverted pendulum robot system," *IEEE ICIT*, pp. 1026-1031, 2009.
- [9] Y. K. Kwon and J. M. Lee, "Optimal ARS control an inverted pendulum robot for climbing ability improvement," *Journal of Korea Robotics Society*, vol. 6, no. 2, 2011.
- [10] J. H. Lee, "Re-analysis of lyapunov stability of PI(d) controllers for regulation of second order servo systems," *KACC*, 1998.
- [11] K. J. Astrom and T. Hagglund, "Automatic tuning of PID Controllers," *Instrumentation Systems*, Pittsburgh, 1988.
- [12] B. H. Kim, "Analysis on climbing of wheel drive robotics mechanisms," *Korea Intelligent Information Systems Society*, vol. 18, no. 3, pp. 329-334, 2008.
- [13] S. H. Choi, J. H. Do, and J. M. Lee, "Roll/pitch attitude control of an underwater robot using ballast tanks," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 19, no. 8, pp. 605-693, 2013.

- [14] S. I. Lee, I. W. Lee, M. S. Kim, H. H., and J. M. Lee, "Balancing and driving control of a bicycle robot," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, vol. 18, no. 6, pp. 532-539, 2012.



#### 정 희 인

2013년 동아대학교 전자공학과 졸업.  
2013년~현재 부산대학교 대학원 전자전  
기컴퓨터공학과 석사과정 재학. 관심분  
야는 협조제어, 주행제어, 지능로봇 시  
스템, 마이크로프로세서.



#### 이 상 용

2012년 동아대학교 전자공학과 졸업.  
2014년 부산대학교 대학원 로봇관련협  
동과정 석사과정 졸업. 관심분야는 로  
봇 밸런싱, 마이크로프로세서 응용.



#### 이 장 병

1980년 서울대학교 전자공학과 졸업.  
1982년 동 대학원 석사. 1990년 USC 공  
학박사. 1992년~현재 부산대학교 전자공  
학과 정교수. 관심분야는 지능로봇시스  
템 설계 및 제어, 마이크로프로세서응  
용, 센서융합, Navigation/Localization.