

비 모델 외바퀴 로봇의 제어

Control of a Unicycle Robot using a Non-model based Controller

안재원, 김민규, 이장명*
(Jae-Won An¹, Min-Gyu Kim¹, and Jangmyung Lee^{2,*})

¹Department of Electrical and Computer Engineering, Pusan National University

²Department of Electronic Engineering, Pusan National University

Abstract: This paper proposes a control system to keep the balance of a unicycle robot. The robot consists of the disk and wheel, for balancing and driving respectively, and the tilt angle is measured and used for balancing by the IMU sensor. A PID controller is designed based on a non-model based algorithm to prove that it is possible to control the unicycle robot without any approximated linear system model such as the sliding mode control algorithm. The PID controller has the advantage that it is simple to design the controller and it does not require an unnecessary complex formula. In this paper, assuming that the pitch and roll axis are dynamically decoupled, each of the two controllers are designed separately. A reaction wheel pendulum method is used for the control of the roll axis, that is, for balancing and an inverted pendulum concept is used for the control of the pitch axis. To confirm the performance of the proposed controllers using MATLAB Simulink, the dynamic equations of the robot are derived.

Keywords: unicycle robot, balancing control, PID control, reaction wheel pendulum, inverted pendulum

I. 서론

본 논문에서는 무인 주행 로봇 중 외바퀴 로봇에 대하여 다룬다. 외바퀴 로봇은 하나의 바퀴를 이용하여 이동하는 로봇을 일컫는다. 외바퀴 로봇은 다른 2륜, 4륜 혹은 그 이상의 모바일 로봇에 비하여 협소한 공간에서의 이동성이 좋고, 무게가 가볍고 한 개의 바퀴로 구동되기 때문에 가격적인 면에서도 이득이 있다.

외바퀴 로봇에 대한 연구는 1980년대 초부터 일본과 미국 외 여러 나라에서 연구를 진행해왔고[1-3], 1990년대 부터는 국내에서도 연구를 진행해오고 있다[4]. 그 중 1980년에 일본에서 최초로 연구된 외바퀴 로봇은 회전 바퀴의 입력 토크를 제어하는 방법으로 앞뒤 움직임을 조절하는 pitch 축 제어, 좌우 움직임을 조절하는 roll 축 제어를 하였다[5]. 1987년 Stanford 대학의 A.schoolwinkel은 본인의 박사논문에서 처음으로 인간형 외바퀴 로봇의 동역학 해석에 대하여 저술하였다. 동역학 모델은 회전바퀴, 로봇프레임, 인간형 몸체 및 양팔 구조로 설정하였고, 몸체에 회전을 제어하여 자세제어가 이루어지도록 하였다. 또한 제어기는 상태 평형점에 대한 선형화 모델을 기초로 하였다[6].

본 연구실에서도 지난 몇 년간 외바퀴 로봇에 대한 연구를 진행해왔다. 그러나 기존에 제안한 외바퀴 로봇의 연구는 모델 기반의 제어기로 하여 동역학 방정식을 구하는 과정이

복잡하고, 이로 인해 연산량이 증가하고 제어기 설계 과정이 까다로운 문제가 있었다[7,8] 따라서 본 논문에서는 복잡한 수식 없이 간략하게 제어하기 위해 비 모델 기반의 PID 제어를 제시한다. PID 제어기는 그 단순성과 뛰어난 효율성으로 현대 산업현장에 가장 많이 쓰이고 있다[9,10].

그림 1은 실제 실험에 사용된 외바퀴 로봇이다. 로봇은 disk를 회전하기 위한 DC 모터와 Wheel 제어용 DC 모터, 각도를 측정하기 위한 IMU (Inertial Measurement Unit) 센서를 사용하였다. 외바퀴 로봇은 Decouple 되었다고 가정하고 Roll 축은 Reaction Wheel Pendulum 형태를 적용, Pitch 축은 Inverted Pendulum 형태를 적용하여 제어한다[11].



그림 1. 외바퀴 로봇.
Fig. 1. Unicycle robot.

* Corresponding Author

Manuscript received December 4, 2013 / revised January 14, 2014 / accepted March 20, 2014

안재원, 김민규: 부산대학교 전자전기컴퓨터공학과
(jaewon1696@pusan.ac.kr/mingyu1696@pusan.ac.kr)

이장명: 부산대학교 전자전기공학부(jmlee@pusan.ac.kr)

* 본 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2013R1A1A2021174).

* 본 논문은 2014년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2010-0024129).

본 논문은 II 장에서 외바퀴 로봇의 시스템과 제어기의 성능을 분석하기 위해 Lagrange Equation을 이용한 동역학모형을 유도한다. III 장에서는 외바퀴 로봇의 전체적인 시스템 구성 및 Pitch 축과 Roll 축의 제어기를 설계한다. IV 장에서는 MATLAB Simulink를 이용하여 외바퀴 로봇을 시뮬레이션하고, 실제 외바퀴 로봇에 제어기를 적용하여 제어가 가능함을 검증한다. 마지막으로 V 장에서 결론을 맺도록 구성한다.

II. 동역학

본 장에서는 외바퀴 로봇의 동역학 모델을 제시한다. 외바퀴 로봇의 시뮬레이션을 위해 동역학 모델을 유도한다. 로봇의 시뮬레이션을 위해선 로봇 시스템 방정식이 필요하다. 따라서 시스템 방정식을 위해 동역학 방정식을 구하였다. 외바퀴 로봇은 Decouple된 형태로 Roll 축과 Pitch 축의 동역학을 Lagrange Equation을 이용하여 각각 구한다.

1. Roll 축 동역학

외바퀴 로봇의 Roll 축 동역학 모델은 disk와 body를 Reaction Wheel Pendulum 형태로 간주하고 동역학을 유도하였다 [12]. 여기서 L_1 은 바닥에서 로봇몸체의 질량중심까지의 거리, L_2 는 바닥에서 disk의 중심까지의 거리이다. R_D 는 disk의 반지름, θ_1 은 로봇의 회전 변위, θ_2 는 disk의 회전변위이다. 그리고 로봇몸체의 질량은 M_1 , disk의 질량은 M_2 로 정의한다. 본 논문에서는 Lagrange Equation을 이용하여 외바퀴 로봇의 동역학을 유도하였다. Lagrange Equation은 다음과 같이 정의된다.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\mathbf{q}}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \mathbf{q}} = \tau_q \tag{1}$$

Lagrangian을 구하기 위해 위치벡터를 설정한다. \vec{r}_1 은 로봇 몸체의 위치 벡터, \vec{r}_2 는 Disk의 위치 벡터이다.

$$\vec{r}_1 = L_1 \sin \theta_1 \vec{i} + L_1 \cos \theta_1 \vec{j} \tag{2}$$

$$\vec{r}_2 = L_2 \sin \theta_1 \vec{i} + L_2 \cos \theta_1 \vec{j} \tag{3}$$

Disk와 로봇몸체의 속도벡터는 위치벡터를 미분함으로써 얻을 수 있다.

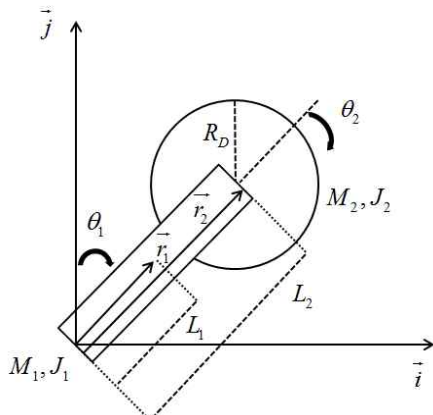


그림 2. Roll 축 모델.
Fig. 2. Model of roll axis.

$$\vec{v}_1 = L_1 \cos \theta_1 \dot{\theta}_1 \vec{i} - L_1 \sin \theta_1 \dot{\theta}_1 \vec{j} \tag{4}$$

$$\vec{v}_2 = L_2 \cos \theta_1 \dot{\theta}_1 \vec{i} - L_2 \sin \theta_1 \dot{\theta}_1 \vec{j} \tag{5}$$

로봇의 운동에너지와 위치에너지는 다음과 같다.

$$T = \frac{1}{2} M_1 (\vec{v}_1 \cdot \vec{v}_1) + \frac{1}{2} M_2 (\vec{v}_2 \cdot \vec{v}_2) + \frac{1}{2} J_1 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} J_2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 \tag{6}$$

$$V = M_1 g L_1 \cos \theta_1 + M_2 g L_2 \cos \theta_1 \tag{7}$$

운동에너지와 위치에너지를 이용하여 Lagrangian을 구하고, 이것을 대입하여 Lagrange Equation을 구한다.

$$(J_1 + L_1^2 M_1 + L_2^2 M_2) \ddot{\theta}_1 - g(L_1 M_1 + L_2 M_2) \sin \theta_1 = -\tau \tag{8}$$

$$J_2 (\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2) = \tau \tag{9}$$

\mathbf{q} 는 각 상태를 의미하고, τ 는 Disk의 토크를 의미한다.

2. Pitch 축 동역학

외바퀴 로봇의 Pitch 축 동역학 모델의 경우, Body와 회전 바퀴를 Inverted Pendulum 형태로 간주하고 동역학을 유도하였다 [13]. 여기서 L 은 회전바퀴의 중심에서 로봇몸체 중심까지의 거리, R 은 회전바퀴의 반지름이다. θ 는 회전바퀴의 회전변위 ψ 는 로봇몸체의 회전변위를 의미한다. Lagrange Equation을 이용해 동역학을 구하기 위해 위치벡터를 구한다.

$$\vec{r}_1 = R\theta \vec{i} + R\vec{j} \tag{10}$$

$$\vec{r}_2 = (R\theta + L \sin \psi) \vec{i} + (R + L \cos \psi) \vec{j} \tag{11}$$

로봇의 운동 에너지는 다음과 같다.

$$T = \frac{1}{2} m (\vec{v}_1 \cdot \vec{v}_1) + \frac{1}{2} M (\vec{v}_2 \cdot \vec{v}_2) + \frac{1}{2} J_w \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} J_\psi \dot{\psi}^2 + \frac{1}{2} n^2 J_m (\dot{\theta} - \dot{\psi})^2 \tag{12}$$

여기서 J_w 는 회전바퀴의 회전관성, J_ψ 는 로봇몸체의 회전 관성, J_m 은 모터 전기자의 회전관성 이다. m 은 모터의 기어 비율이다. 위치에너지 V 는 다음과 같다.

$$V = mgR + Mg(R + L \cos \psi) \tag{13}$$

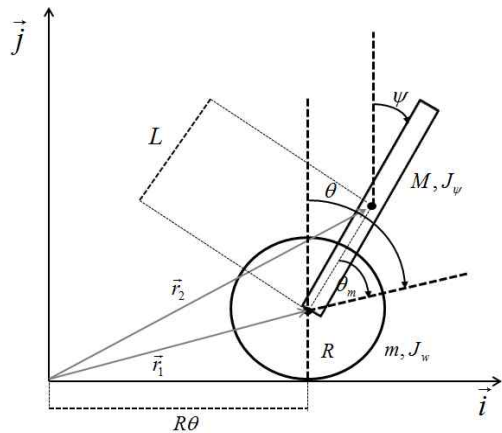


그림 3. Pitch 축 모델.
Fig. 3. Model of pitch axis.

이를 이용하여 Lagrangian을 구하고 Lagrange Equation에 대입하면 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$(J_w + J_m n^2 + (m + M)R^2)\dot{\theta} + (LMR \cos \psi - J_m n^2)\ddot{\psi} + LMR \sin \psi \dot{\psi}^2 = \tau_\theta \quad (14)$$

$$(LMR \cos \psi - J_m n^2)\dot{\theta} + (J_\psi + L^2 M + J_m n^2)\ddot{\psi} - gLM \sin \psi = \tau_\psi \quad (15)$$

여기서 τ_θ 는 회전바퀴의 모터에 의해서 발생되며 Inverted Pendulum에 작용하는 τ_ψ 는 τ_θ 와 크기는 같고 방향은 반대로 작용한다.

위의 과정을 통해 roll 축과 pitch 축의 동역학 모델이 얻어진다. 동역학 방정식을 이용하여 MATLAB Simulink를 실행하여 외바퀴 로봇의 시스템을 분석 및 설계한 제어기의 적합성을 판단한다.

III. 시스템 구성 및 제어기 설계

1. 시스템 구성

외바퀴로봇의 roll, pitch 축 제어는DC모터를 이용하여 로봇의 상단에 설치된 disk와 하단의 wheel을 회전시켜 균형을 유지한다. 그림 4는 외바퀴 로봇의 전체적인 시스템 구성을 나타낸다.

MCU는 IMU 센서로부터 로봇의 각도를 받아 제어기의 입력으로 사용한다. 제어기를 통해 각도를 PWM으로 변환하여 roll 축과 pitch 축의 DC Motor로 전송되어 토크와 회전속도를 제어한다.

2. 제어기 설계

외바퀴 로봇의 roll 축과 pitch 축이 Decouple되었다고 가정하고 제어기를 각각 설계하였다. 제어기의 입력은 로봇 몸체의 각도를 사용하고, 로봇의 중심은 0도라 한다. 제어기 내부의 PID항은 로봇의 몸체를 0도로 맞추기 위한 제어신호를 출력한다.

2.1 Pitch 축 제어기

그림 5는 pitch 축 제어를 위한 제어기의 구조이다. Desired Angle은 0도로 로봇이 균형상태일 때의 각도이며, θ 는 로봇 몸체의 pitch 축 각도이다. 로봇의 pitch 축 각도를 피드백 받아 Desired Angle과의 오차를 제어기의 입력으로 사용한다. P제어는 오차를 P항의 이득 값을 곱하여 제어 값을 출력한다. 여기에 D항의 이득 값을 추가하여 P 이득 값에 의해 발생하는 overshoot를 제거한다. 마지막으로 I 항의 이득 값을 추가하여 정상상태 오차를 줄였다. 이와 같은 P, I, D항의 이득

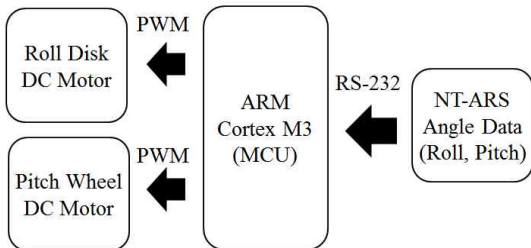


그림 4. 외바퀴 로봇의 시스템 구성.
Fig. 4. Overall system of the unicycle robot.

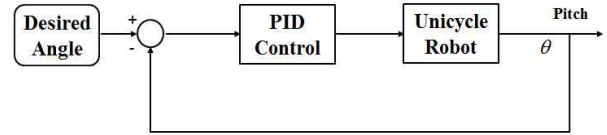


그림 5. Pitch축 제어기.
Fig. 5. Pitch controller.

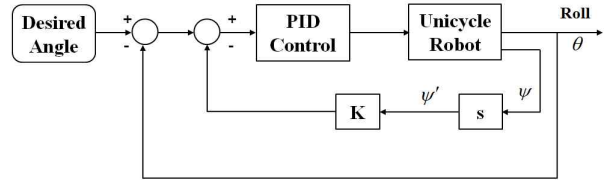


그림 6. Roll 축 제어기.
Fig. 6. Roll controller.

값을 적절히 조절하여 pitch 축의 균형제어가 안정적으로 이루어지도록 하였다. 이 때, 제어기의 이득상수는 실험을 통하여 얻었다.

2.2 Roll 축 제어기

그림 6은 외바퀴 로봇의 Roll 축 제어기의 구조이다. 여기서 θ 는 로봇몸체의 Roll 축 각도이며, ψ 는 disk의 회전속도를 의미한다. 제어기는 PID 제어기를 기반으로 설계하였으며, ψ' 항을 추가로 피드백 받는 형태로 설계하였다. Reaction Wheel Pendulum 형태는 disk의 순간적인 가속을 이용하여 로봇의 균형을 제어한다. 이 때, IMU 센서는 센서의 온도에 따라 출력되는 각이 수시로 변한다. 저온(약 5도)에서는 2도 정도의 오차가 발생하고 고온(약 55도)에서는 10도 이상의 오차가 발생하게 된다. 그리고 약 25도에서 0.3도 정도의 오차가 발생한다. 이에 따라 오프셋도 함께 변하면서 로봇의 균형이 변하게 된다. 따라서 IMU 센서를 이용하여 균형 제어를 할 경우 정확한 균형점을 찾는 것이 필요하다. 만약 센서 값에 오프셋 에러가 존재할 경우 로봇이 기울어진 상태에서 균형을 유지하려 한다. 이에 따라 모터의 속도는 무한히 증가하게 된다. 하지만, 실제 모터는 출력할 수 있는 토크가 제한되어 있으므로 모터의 한계에 의해 로봇은 균형을 잃게 된다. 그러므로 기울기 각도를 이용하여 균형 제어를 할 경우 정확한 실제 균형점을 찾는 것이 중요하다. 이러한 문제점을 보완하기 위해 disk의 속도가 0인 지점이 실제 균형점이라 가정하고, ψ' 항을 피드백 받아 제어기 입력에 더해지도록 하였다 [14]. 여기서 ψ' 항은 disk속도가 증가함에 따라 입력 각도를 변경하는 역할을 한다.

IV. 시뮬레이션 및 실험 결과

본 장에서는 설계한 제어기를 MATLAB Simulink를 이용하여 시뮬레이션하고 외바퀴 로봇에 적용하여 성능을 확인하고 분석한다. 외바퀴 로봇의 실험은 미끄럽지 않은 평평한 바닥에서 진행하였다. 외바퀴 로봇의 균형 제어는 정지 상태와 직선 주행 시 Roll 축과 Pitch 축의 각도를 통하여 확인한다. 이 때, MCU의 동작은 10ms의 주기로 동작하도록 하였다.

1. 시뮬레이션

그림 7과 그림 8은 외바퀴 로봇의 동역학 모델을 이용한

roll 축 pitch 축의 시뮬레이션 결과이다. 초기 각도를 2도로 설정하였으며 1초 이내에 0도로 수렴한다.

시뮬레이션 결과를 통해 안정적으로 균형 제어가 되는 것을 확인할 수 있다. 그러므로, Pitch 축은 Inverted pendulum, Roll 축은 Reaction wheel pendulum을 외바퀴 로봇에 적용하여 제어할 수 있다는 것을 알 수 있다. 표 1은 외바퀴 로봇의 동역학 도출 과정에서 사용된 parameter 값이다.

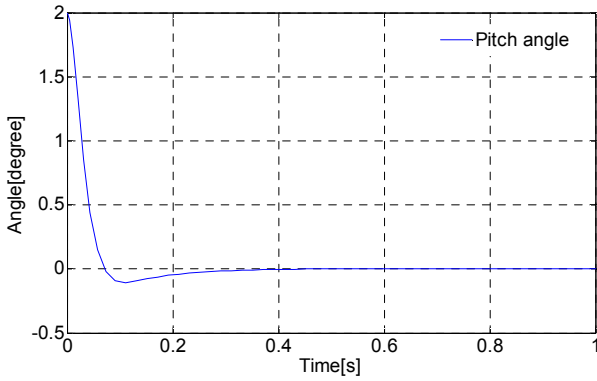


그림 7. Pitch 축 시뮬레이션 결과.
Fig. 7. Simulation result of pitch axis.

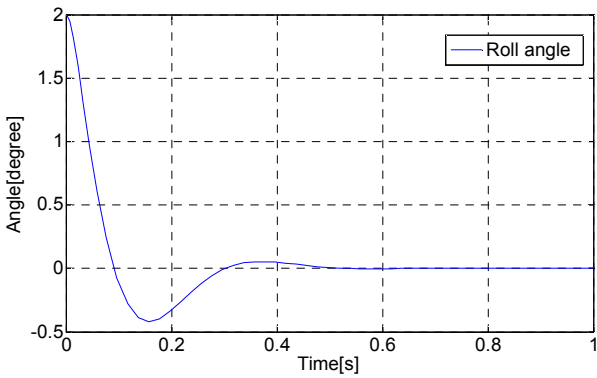


그림 8. Roll 축 시뮬레이션 결과.
Fig. 8. Simulation result of roll axis.

표 1. 외바퀴 로봇의 parameter 값.
Table 1. Parameters of the unicycle robot.

Symbol	Value
M_1	4.889 [kg]
M_2	1.225 [kg]
m	1.300 [kg]
M	4.964 [kg]
R	0.110 [m]
R_D	0.200 [m]
L_1	0.285 [m]
L_2	0.570 [m]
L	0.330 [m]
J_1	0.5295 [kgm^2]
J_2	0.402 [kgm^2]
J_w	0.0079 [kgm^2]
J_ψ	0.7208 [kgm^2]
J_m	0.00001 [kgm^2]

2. 균형 제어

외바퀴 로봇이 정지해있을 때 균형 제어를 실험한 결과이다. Pitch 축 제어는 PID 제어를 기반으로 설계하였으며 Roll 축은 PID 제어기에 ψ' 항을 추가로 피드백 받아서 설계하였다. Roll 축 제어 실험에는 ψ' 항을 추가했을 때와 ψ' 항을 추가하지 않았을 때의 결과를 비교하였다.

그림 9는 균형 제어 시 측정된 Pitch 축의 각도를 나타내며, 10초 동안 실험한 결과이다. 대부분 ± 2 도 내에서 자세 제어가 이루어지는 것을 확인할 수 있다.

그림 10은 제어기에 ψ' 항을 추가하지 않았을 때의 Roll 축

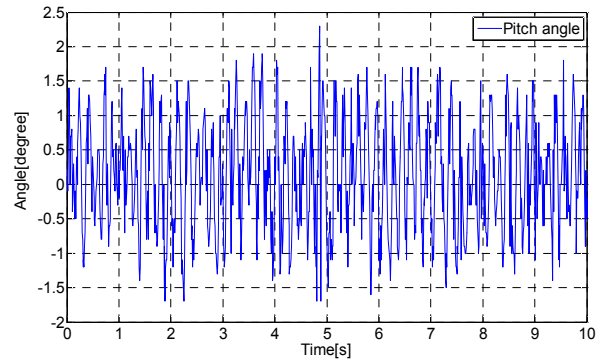


그림 9. Pitch 축 각도.
Fig. 9. Angle of pitch axis.

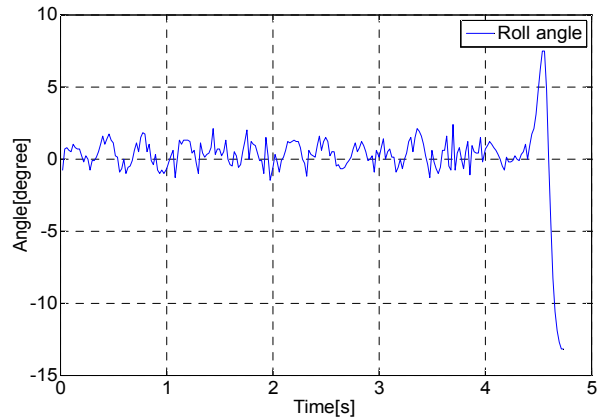


그림 10. ψ' 항이 없을 때의 Roll 각도.
Fig. 10. Angle of roll axis without the ψ' term.

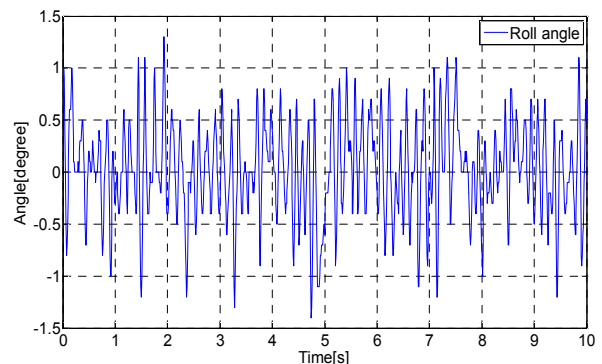


그림 11. ψ' 항을 추가했을 때의 Roll 각도.
Fig. 11. Angle of roll axis with the ψ' term.

각도를 나타낸다. 약 4초정도 균형을 유지하다 쓰러지는 것을 확인할 수 있다.

그림 11은 제어기에 ψ' 항을 추가했을 때의 Roll 축 각도를 나타내며, 10초 동안 실험한 결과이다. 외바퀴 로봇의 Roll 축 제어는 ± 1.5 도 내에서 안정적으로 이루어 짐을 알 수 있다. 이 실험을 통해 ψ' 항을 추가한 제어기가 더욱 안정적인 것을 확인할 수 있다.

3. 직선주행 제어

본 논문에서 제시한 제어기의 성능을 확인하기 위해 직선 주행 실험을 하였다. 그림 12는 직선 주행 때의 거리를 측정한 결과로 1.8m 주행하였다.

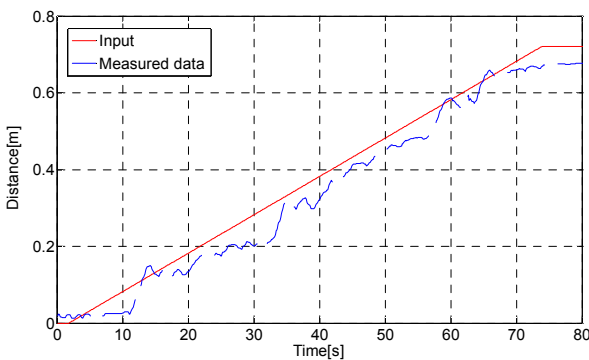


그림 12. 직선 주행 결과.
Fig. 12. Result of straight driving.

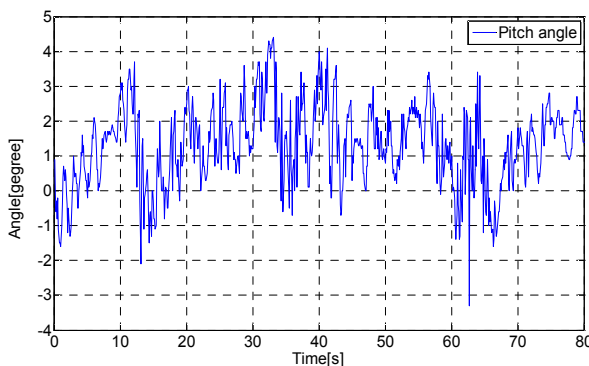


그림 13. 직선 주행 시 Pitch 축 각도.
Fig. 13. Angle of pitch axis when straight driving.

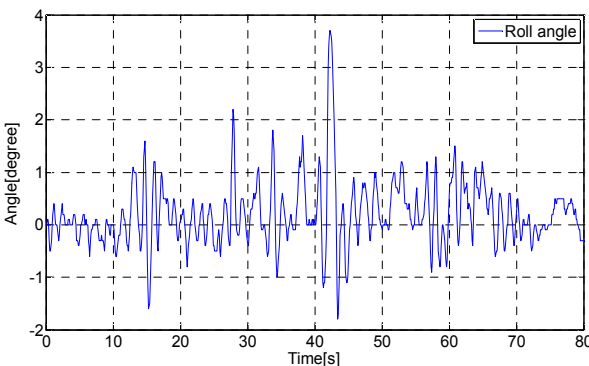


그림 14. 직선 주행 시 Roll 축 각도.
Fig. 14. Angle of roll axis when straight driving.

표 2. 각 제어기의 이득 값.

Table 2. A gain of each controller.

Symbol		Value
Pitch 제어기	P	19
	I	0.1
	D	0.2
Roll 제어기	P	23.5
	I	1.2
	D	0.7
	ψ'	0.06

그림 13은 직선 주행 시 측정된 Pitch 축 각도이며, 80초 동안 실험한 결과이다. -2도에서 4도 이내에서 균형제어가 이루어 지는 것을 확인할 수 있다.

그림 14는 직선 주행 시 측정된 Roll 축 각도이며, 80초 동안 실험한 결과이다. 대부분 ± 2 도 내에서 균형제어가 이루어 진다.

본 논문에서 사용된 P, I, D항의 이득 값과 ψ' 값은 실험을 통해 얻었으며, 그 값은 표2에 기술하였다.

V. 결론

본 논문에서는 외바퀴 로봇의 자세 제어와 주행 제어에 대하여 연구하였다. 본 논문에서 제시한 제어기가 외바퀴 로봇의 제어에 적합한지 판단하기 위해 동역학을 유도하였다. 동역학은 Roll 축과 Pitch 축을 각각 Decouple된 형태로 가정하고 동역학 방정식을 유도하였다. MATLAB Simulink를 통하여 제시한 제어기가 안정적으로 제어되는 것을 확인하였다. Pitch 축은 Inverted Pendulum 형태를 이용하고, Roll 축은 Reaction Wheel Pendulum 형태를 적용하여 로봇을 제어하였다. Roll 축 제어를 위해 ψ' 항을 추가로 피드백 받아 로봇의 오프셋 각도를 조절함으로써 안정적으로 균형 제어 및 주행 제어를 할 수 있도록 하였다. 그리고 모든 이득 값들은 실험을 통하여 얻었다. 균형 제어와 주행 제어의 실험을 통하여 복잡한 수식과 연산을 필요로 하는 모델링 기반을 사용하지 않아도 간단한 구조와 구현하기 쉬운 PID제어기와 같은 비 모델링 기반의 제어기로도 외바퀴 로봇의 제어가 가능한 것을 확인할 수 있었다. 향후 균형 제어를 중심으로 경사 주행과 곡선 주행과 같은 주행 제어에 관한 연구가 필요할 것이다.

REFERENCES

- [1] Z. Sheng and K. Yamafuji, "Postural stability of a human riding a unicycle and its emulation by a robot," *IEEE Trans. Robotics and Automation*, vol. 13, no. 5, pp. 709-720, Oct. 1997.
- [2] A. Sadowska, D. Kostić, N. van de Wouw, H. Huijberts, and H. Nijmeijer, "Distributed formation control of unicycle robots," *2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, May 2012.
- [3] S. Langius and R. A. de Callafon, "Dynamic modeling of a moment exchange unicycle robot," *7th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics*, vol. 2, pp. 216-221, 2010.
- [4] J.-W. Kim and H.-G. Jung, "Fuzzy rule for curve path tracking of a unicycle robot," *KSPE General Meeting and Spring Conference*, pp. 425-429, 1996.

- [5] C. Ozaka, H. Kano, and M. Masubuchi, "Stability of a monicycle-type inverted pendulum, tird vehicle automation," *In Symposium, Automatic Control Soc.*, pp. 63-66, 1980.
- [6] A. Schoonwinkel, "Design and test of a computer stabilized unicycle," Ph.D. Dissertation, Stanford Univ., CA, 1987.
- [7] H. Lim, J.-M. Hwang, B.-H. Ahn, and J. M. Lee, "Robust yaw motion control of unicycle robot," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 15, no. 11, pp. 1130-1136, Nov. 2009.
- [8] S.-H. Kim, J.-O. Lee, J.-M. Hwang, B.-H. Ahn, and J.-M. Lee, "Dynamic modeling and performance improvement of a unicycle robot," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 16, no. 11, pp. 1174-1181, Nov. 2010.
- [9] M.-Y. Lee, D.-G. Koo, and J.-M. Lee, "Optimal design and real application of nonlinear PID controllers," *Journal of Control, Automation and Systems Engineering*, vol. 3, no. 6, Dec. 1997.
- [10] C. D. P. Nugroho and E. pitowano, "Effect of dynamics loading on a PID controlled two-wheeled vehicle of wheelchair-based inverted pendulum," <http://repo.eepis-its.edu/1280/>
- [11] J.-O. Lee, I.-W. Han, and J.-M. Lee, "Attitude and direction control of the unicycle robot using fuzzy-sliding mode control," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 18, no. 3, pp. 275-584, Mar. 2012.
- [12] D. Block, K. Åström, and M. Spong, "The reaction wheel pendulum," *Synthesis Lectures on Control and Mechatronics*, Morgan & Claypool Publishers, Princeton, NJ, 2007.
- [13] TechnicalreportofLEGO Mindstorm, <http://www.Mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/19147>
- [14] S.-I. Lee, I.-W. Lee, M.-S. Kim, H. He, and J.-M. Lee, "Balancing and driving control of a bicycle robot," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 18, no. 6, pp. 532-539, Jun. 2012.
- [15] H.-G. Min, J.-H. Kim, J.-H. Yoon, E.-T. Jeung, and S.-H. Kwon, "A control of balancing robot," *Journal of the Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 16, no. 12, 1201-1207, Dec. 2010.



안재원

2012년 동서대학교 전자공학과 졸업.
2014년 부산대학교 대학원 전자전기컴퓨터공학과 석사과정 졸업. 관심분야는 로봇 밸런싱, 비선형제어.



김민규

2013년 부산대학교 전자전기공학과 졸업. 2013년~현재 부산대학교 전자전기 컴퓨터공학과 석사과정 재학중. 관심분야는 지능 제어, 마이크로 프로세서 응용.



이장명

1980년 서울대학교 전자공학과 졸업.
1982년 동 대학원 석사. 1990년 USC 공학박사. 1992년~현재 부산대학교 전자전기공학부 정교수. 관심분야는 지능로봇 시스템 설계 및 제어, 마이크로 프로세서 응용, 센서융합, Navigation/Localization.